

DEFINIÇÃO DA ALTURA DE ONDA DE PROJETO EM OBRAS COSTEIRAS

Bárbara Marinho¹; Márcia Lima^{1,2}; Carlos Coelho^{1,2} e Lucília Luís³

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

³Consulmar, 1099-062, Lisboa, Portugal. lucilia.luis@consulmar.pt

RESUMO

O pré-dimensionamento do manto resistente de uma estrutura costeira de taludes é realizado com base em fórmulas empíricas, assentes em simplificações teóricas e em resultados de ensaios em modelos, que permitem determinar o peso dos blocos que o constituem e que deverão resistir às mais variadas solicitações (agitação marítima, marés e correntes). De todas as ações a que uma estrutura costeira está sujeita, a que mais afeta a estabilidade da estrutura é a agitação marítima, sendo representada essencialmente pela altura de onda de projeto (H_{proj}).

Desta forma, este trabalho procura realçar a importância da definição da altura de onda de projeto, no processo de pré-dimensionamento de estruturas costeiras. São apresentadas e discutidas algumas propostas existentes, tendo em conta os principais fatores que a influenciam, nomeadamente, o regime de extremos, a batimetria/topografia do local de implantação da obra e a respetiva profundidade, o tipo de estrutura e duração dos temporais.

Palavras-Chave: projeto, estrutura costeira de taludes, pré-dimensionamento, altura de onda.

1. INTRODUÇÃO

Os problemas de erosão que algumas zonas do litoral enfrentam e a necessidade crescente da existência de áreas onde seja possível estabelecer o transporte marítimo de pessoas e bens, tornando facilitadas as operações de acostagem e de carga/descarga das embarcações, permitem projetar que os investimentos necessários na realização de estruturas costeiras sejam cada vez maiores.

Na sua grande maioria, estas estruturas costeiras têm secção transversal de taludes e são constituídas por: núcleo de enrocamento não selecionado; filtros ou mantos intermédios que correspondem a uma ou mais camadas de enrocamento selecionado; manto resistente, constituído por blocos naturais ou artificiais de peso W ; risberma ou patamar de apoio, constituindo o remate inferior do manto resistente; e, coroamento que corresponde à linha definida pelos pontos de cota máxima da estrutura (Figura 1).

O projeto destas estruturas envolve diversas fases, que vão desde a caracterização do local de implantação da estrutura e avaliação das ações em presença, à validação dos resultados obtidos no pré-dimensionamento, através de ensaios em modelo físico. As ações que solicitam as obras marítimas durante o seu período de vida útil são devidas essencialmente aos fenómenos de hidrodinâmica marítima. Segundo Pita (1985), estes fenómenos manifestam-se essencialmente através da agitação marítima, das marés e das correntes. No entanto, dada a sua severidade, é a agitação marítima que mais afeta a estabilidade das estruturas, podendo mesmo originar a sua ruína.

No processo de pré-dimensionamento, a caracterização da agitação marítima é realizada com recurso à definição do parâmetro “altura de onda de projeto”. Este parâmetro assume especial importância, uma vez que para além de ser um dos principais aspetos que mais influência tem na estabilidade das estruturas, é ainda muito dependente da experiência e sensibilidade do projetista na consideração de todos os fatores intervenientes.

Com o presente trabalho pretende-se clarificar o processo de cálculo da altura de onda de projeto, tanto no caso de estruturas situadas em águas profundas, como também para estruturas situadas a pequenas profundidades. Neste último caso, serão apresentados alguns métodos que tentam estabelecer uma relação das alturas de onda compatíveis com os fundos. Apresentam-se ainda resultados da análise de sensibilidade realizada aos diversos métodos (que têm por base uma agitação de carácter regular e irregular), com o objetivo de avaliar a influência da variação de cada um dos parâmetros envolvidos na determinação da altura de onda.

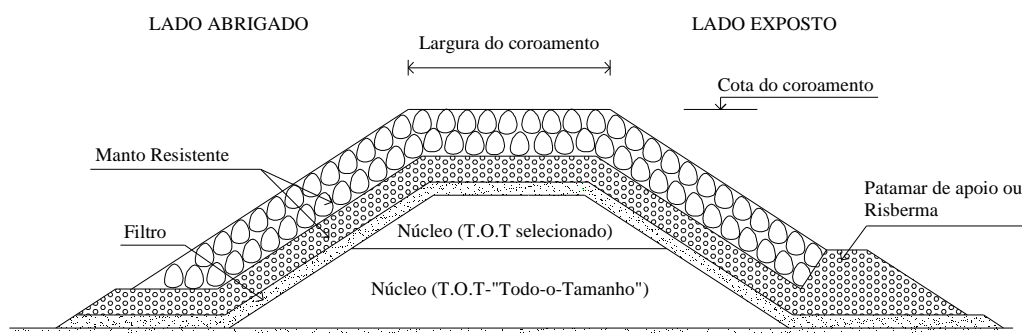


Figura 1 - Designação das partes constituintes do perfil corrente de uma estrutura de talude (adaptado de Pita, 1986 e Fleming *et al.*, 1998).

2. ONDA DE PROJETO

Na fase de conceção, a avaliação da agitação de projeto assume especial importância, visto que a sua subavaliação poderá resultar num maior risco para a estrutura e a sua sobreavaliação num aumento do custo da obra. De acordo com Taveira-Pinto e Neves (2003), qualquer estrutura marítima deve ser dimensionada de modo a suportar o efeito das ondas previstas no local da obra. No entanto, surge ao projetista a questão de saber qual a altura de onda, H , que deve utilizar para o dimensionamento de estruturas marítimas.

Acontece que, a ordem de grandeza das várias profundidades que a estrutura atravessa ao longo da sua extensão pode ditar o processo de cálculo da altura de onda de projeto. Na presente secção, após se definir a altura de onda, pretende-se ressaltar a importância e a influência das profundidades de implantação das estruturas no cálculo da altura de onda de projeto, primeiramente, expondo os procedimentos a adotar no caso de estruturas situadas em águas profundas e em seguida, de forma mais particular, nas situações em que as estruturas se situam a pequenas profundidades. Por fim, apresentam-se as grandezas da altura de onda propostas por vários autores para representação da altura de onda de projeto.

2.1. Altura de onda

Segundo Coelho (2005), ondas, vagas, seichas e tsunamis são diferentes tipos de agitação marítima. No entanto, devido à frequência com que ocorrem e ao nível de energia correspondente, o tipo de agitação que mais influencia o dimensionamento das estruturas são as ondas. Na generalidade dos métodos existentes de pré-dimensionamento das estruturas, as ondas são consideradas através do parâmetro altura de onda de projeto (H_{proj}). Os métodos de pré-dimensionamento resumem-se basicamente a diferentes formulações (deduzidas com base em resultados de modelos físicos), que permitem determinar o peso unitário dos blocos do manto resistente das estruturas, necessário para resistir à ação da altura de onda incidente (representada neste processo pelo parâmetro H_{proj}). Nestes métodos semi-empíricos, a altura de onda de projeto interfere de forma direta na estabilidade da estrutura, uma vez que o valor do peso dos blocos do manto resistente, W , é diretamente proporcional a H_{proj} elevado ao

cubo. Em seguida, descrevem-se algumas representações frequentes da altura de onda e tecem-se alguns comentários acerca da análise da agitação marítima como regular ou irregular.

Grandezas representativas da altura de onda

Existem várias representações das alturas de onda, sendo as mais frequentes definidas em seguida, por ordem decrescente das suas alturas:

- Altura de onda máxima: $H_{máx}$. Este parâmetro refere-se à onda com maior altura e período que ocorre durante um registo.
- Altura média do décimo superior: $H_{1/10}$. Altura média da onda que é excedida por 10% das ondas, ou ainda, a média das alturas de onda dos 10% das ondas maiores. As ondas de um registo são contadas e selecionadas por ordem decrescente de altura até um décimo do número total de ondas registadas durante um determinado intervalo de tempo. A média dessas alturas é calculada e definida, então, como $H_{1/10}$ (Goda, 1985).
- Altura de onda significativa: H_s . Altura média do terço mais alto das ondas. O processo de cálculo é análogo à grandeza anterior, com a diferença de seleção do terço mais elevado do número total de ondas registadas.
- Altura de onda média: \bar{H} . Altura média de todas as ondas de um registo.
- Altura de onda média quadrática: H_{rms} (Equação 1). Raiz quadrada da média dos quadrados das alturas de onda de um registo.

$$H_{rms} = \sqrt{\frac{\sum H^2}{N}} \quad (1)$$

O parâmetro N corresponde ao número total de ondas de um registo e H à altura de onda.

Altura de onda equivalente em águas profundas, H'_0

A análise do processo de transformação da onda é frequentemente facilitada pela introdução do conceito de onda equivalente ao largo. Esta onda é uma onda hipotética, determinada com a finalidade de ajustar as alturas das ondas afetadas pelo fenómeno de refração, difração ou outros fenómenos de alteração da agitação, na propagação em direção à costa, de modo que a estimativa da transformação e deformação da onda possa ser mais facilmente realizada quando se lida com uma topografia complexa (Goda, 1985). Segundo Goda (1985), a altura de onda equivalente ao largo (correspondente à altura de onda significativa) pode ser definida pela expressão seguinte.

$$H'_0 = K_d K_r (H_s)_0 \quad (2)$$

Em que $(H_s)_0 = H_0$, isto é, corresponde à altura de onda significativa ao largo, K_r corresponde ao coeficiente de refração e K_d ao coeficiente de difração (apenas aplicável se existirem obstáculos naturais à normal propagação da onda, como por exemplo, a existência de uma ilha). Goda (1985) refere ainda que o uso do conceito de altura de onda equivalente é restringido ao âmbito da onda significativa como representante de um grupo de ondas. Este conceito não é aplicado a outras grandezas, como a maior onda ou a onda média.

Regularidade/irregularidade da agitação marítima

Nas fases de pré-dimensionamento e modelação física das estruturas, a agitação marítima pode ser considerada de forma regular ou irregular. De acordo com Taveira-Pinto e Neves (2003), a consideração da agitação marítima como regular constitui a abordagem mais simples da agitação, pressupondo que esta é puramente bidimensional e de pequena amplitude. São ondas facilmente geradas em laboratório, de forma sinusoidal, com alturas, períodos e direções constantes. Por outro lado, a análise da agitação como irregular procura descrever as “reais” características aleatórias tridimensionais da agitação, considerando, portanto, a superfície livre como um conjunto de ondas de diferentes características (alturas e períodos), movendo-se nas mais variadas direções. Estes parâmetros característicos da onda são considerados como

grandezas estatísticas, tornando esta análise apenas possível se existirem dados em quantidade e qualidade suficientes. De salientar que, a grande variabilidade de alturas de onda que uma agitação de carácter irregular traduz, faz com que as várias representações/definições de altura de onda anteriormente descritas sejam muito utilizadas.

2.2. Regime de Extremos

Segundo Taveira-Pinto (2001), o dimensionamento de quebramares em águas profundas e com elevados níveis energéticos de agitação é particularmente difícil. Enquanto no caso de quebramares (ou outras estruturas costeiras) situados em águas pouco profundas, as alturas de onda que podem atingir a estrutura estão limitadas por condicionantes físicas relacionadas com essas profundidades, nos quebramares situados em águas profundas, as alturas de onda máximas têm de ser associadas a períodos de retorno, exigindo séries estatísticas locais relativamente longas. No entanto, a ausência de registos de agitação, associada à complexidade dos fenómenos de agitação em presença, constitui o principal obstáculo ao dimensionamento otimizado de estruturas implantadas a elevadas profundidades.

Assim, nesta subsecção pretende-se caracterizar o cálculo do regime de extremos, necessário aos casos em que as estruturas se encontram implantadas a grandes profundidades.

Valores extremos

Segundo Capitão *et al.* (1999) e CONSULMAR (2011), o conhecimento dos valores extremos das alturas de onda, períodos e direção associadas a determinado período de retorno, isto é, a determinação do regime de extremos, é um aspeto fundamental no dimensionamento estrutural de obras costeiras. Estes valores extremos são normalmente determinados através da análise e extrapolação dos dados disponíveis, aplicando uma ou mais distribuições estatísticas aceites como representativas da distribuição a longo prazo da altura das ondas (CONSULMAR, 2011). De acordo com Taveira-Pinto e Neves (2003), a partir da distribuição das alturas de onda significativas máximas anuais e das alturas de onda máximas anuais, é possível calcular (por extrapolação) as alturas de onda para determinado período de retorno. Para tal, é necessário proceder-se à escolha de um modelo de distribuição de probabilidade. Nesse sentido, ao longo dos anos, vários métodos estatísticos para a análise de valores extremos têm sido desenvolvidos e várias funções de distribuição têm sido aplicadas para ajustar uma amostragem (Piccinini, 2006). Escolhido o modelo de distribuição, será então possível a obtenção dos valores extrapolados da altura de onda, para diferentes períodos de retorno, associados a determinada direção e períodos locais.

As previsões da altura de onda de projeto a considerar no dimensionamento de uma estrutura poderão ser feitas a curto ou a longo prazo. Se se desejar a previsão do clima de agitação marítima a curto termo (para obras provisórias), onde se pretende a distribuição da altura de onda num dado estado de agitação marítima estacionário, poderá recorrer-se à distribuição de Rayleigh, sobre uma base de registos de 3 a 6 horas (muitas vezes, contínuos) e um número de ondas superior a 200 (Taveira-Pinto e Neves, 2003). Se, pelo contrário, a previsão se resumir a uma estimativa a longo prazo (para obras com carácter definitivo), isto é, das alturas de onda significativas extremas, recorre-se geralmente à totalidade das alturas de onda registadas no período de anos, sendo posteriormente determinados os valores máximos anuais. Segundo Taveira-Pinto e Neves (2003), a análise dos tipos de distribuição de probabilidade de ocorrência que melhor se adequam aos registos das alturas de onda significativas, mostra que a distribuição de Weibull e a distribuição log-normal são as que melhor descrevem o comportamento deste parâmetro, recomendando-se a sua utilização na extrapolação para eventos com muito pouca probabilidade de ocorrência (a que correspondem grandes períodos de retorno).

Em alternativa, na ausência de registos de ondas que permitam o tratamento estatístico da altura de onda, é possível obter o regime de extremos através do ONDATLAS (Atlas de Ondas em Portugal), com a extrapolação dos valores máximos anuais a longo prazo da altura significativa e do período médio, para vários períodos de retorno, em diversos pontos ao longo da costa portuguesa. Trata-se de um atlas em formato digital que descreve o clima das ondas e

o recurso energético associado, junto à costa de Portugal continental. Segundo Aguiar *et al.* (2003), este atlas é capaz de fornecer informação estatística muito detalhada em 85 pontos.

2.3. Influência dos fundos

Como referido anteriormente, as alturas de onda que podem atingir estruturas situadas em águas pouco profundas estão limitadas por condicionantes físicas relacionadas com a profundidade e a inclinação dos fundos que marginam a área de implantação, obrigando a que a rebentação das ondas maiores ocorra antes de se atingirem essas estruturas.

Existem vários estudos que tentam estabelecer uma relação entre os fundos e a altura das ondas compatíveis com estes, sendo que os primeiros foram realizados através de ondas solitárias. McCowan (1891), teoricamente, determinou um índice de rebentação de profundidade, adimensional, igual a 0,78 para uma onda solitária sobre um fundo horizontal. Este valor é usualmente considerado na prática da engenharia como uma primeira estimativa do índice (Smith, 2003). Estudos posteriores, desenvolvidos por Miche (1951), Weggel (1972), Seelig (1979), Goda (1985) e outros autores, demonstraram que os índices de rebentação dependem de outros fatores tais como a inclinação da praia e/ou a declividade da onda. Em seguida são descritos alguns métodos propostos por esses autores, sendo que os primeiros têm por objetivo estabelecer a relação entre a profundidade dos fundos e as alturas de onda admitidas por estes, admitindo uma agitação regular (método da teoria da onda solitária, critério de Miche e método de Weggel), e os segundos, uma agitação irregular (critério de Miche, método de CEM, método de Seelig e método de Goda).

Teoria da onda solitária (Smith, 2003)

De acordo com Smith (2003), vários estudos em modelo reduzido e em protótipo permitiram estabelecer um limite máximo da altura de onda incidente dado pelo critério da máxima onda compatível com a profundidade. Nesse sentido, tendo em conta o fenómeno de rebentação, McCowan (1891) determinou um índice baseado na teoria da onda solitária (Equação 3):

$$\frac{H_{m\acute{a}x}}{d}=0.78 \quad (3)$$

Segundo RBRH (1999), a propagação de ondas solitárias em águas pouco profundas apresenta forte similaridade com as ondas reais, sendo por este motivo utilizadas para representar os fenómenos próximos da costa.

O método deduzido por McCowan (1891) possui várias limitações, sendo uma delas a consideração de uma agitação de carácter regular. O fato deste método considerar apenas a influência da profundidade do local e não entrar em linha de conta com outros parâmetros relacionados com os fundos, como a inclinação, ou até mesmo parâmetros hidrodinâmicos característicos das condições de agitação ao largo (altura de onda, período de onda, etc.) torna este método muito limitado. Por este motivo, estudos posteriores foram desenvolvidos no sentido de suprimir algumas destas lacunas.

Miche (1951)

Miche (1951) deduziu, para ondas regulares, um critério de rebentação para determinar a altura de onda máxima em função do comprimento de onda e da profundidade (Equação 4).

$$H_{m\acute{a}x}=0.142L \tanh kd \quad (4)$$

Na expressão, k corresponde ao número de onda ($k=2\pi/L$), d à profundidade do local e L ao comprimento de onda local. A Equação 4, em águas profundas, pode ser traduzida pela Equação 5, e em águas pouco profundas, pela Equação 6 (Smith, 1999).

$$H_{m\acute{a}x}/L=0.142 \quad (5)$$

$$H_{m\acute{a}x}/d=0.88 \quad (6)$$

De acordo com Smith (1999), este critério é eficaz porque inclui o impacto da profundidade e da declividade da onda. No entanto, a Equação 4 foi desenvolvida para ondas regulares, o que não traduz a irregularidade da agitação marítima. Assim sendo, tendo por base um conjunto de dados laboratoriais obtidos de um modelo em canal à escala 1:50, com simulação de correntes opostas, os seguintes critérios de rebentação foram determinados (Smith, 1999):

$$\bar{H}=0.07L \tanh kd \quad (7)$$

$$H_s=0.10L \tanh kd \quad (8)$$

$$H_{1/10}=0.12L \tanh kd \quad (9)$$

$$H_{1/20}=0.13L \tanh kd \quad (10)$$

$$H_{1/100}=0.15L \tanh kd \quad (11)$$

Smith (1999) refere que o efeito da corrente não está explícito nas Equações 7 a 11, mas é considerado de forma implícita no comprimento de onda. O mesmo autor refere ainda que estas expressões são aplicáveis no caso de rebentação, com ou sem a presença de correntes.

Weggel (1972)

A partir de dados de laboratório sobre a rebentação de ondas monocromáticas em fundos de inclinação suave, Weggel (1972) determinou a altura de onda máxima compatível, $H_{m\acute{a}x}$, para um local de profundidade, d (Equação 12).

$$\gamma_b = \frac{H_{m\acute{a}x}}{d} = b - a \frac{H_{m\acute{a}x}}{gT^2} \quad (12)$$

O parâmetro γ_b corresponde ao índice de profundidade de rebentação, T ao período de onda e g à aceleração da gravidade. Os coeficientes a e b são determinados empiricamente em função da inclinação dos fundos, m , de acordo com as Equações 13 e 14.

$$a = 43.8(1-e^{-19m}) \quad (13)$$

$$b = \frac{1.56}{(1+e^{-19.5m})} \quad (14)$$

De acordo com Smith (2003) a Equação 12 é válida para $m \leq 0.1$ e $H'_0/L_0 \leq 0.06$. Segundo o mesmo autor, quando a inclinação da praia se aproxima de zero e a declividade das ondas ($H_{m\acute{a}x}/gT^2$) é baixa, o índice tende para o valor teórico de 0.78. Pelo contrário, quando o declive da praia se aproxima do infinito, o índice tende para o dobro do valor teórico (soma da componente incidente e da componente perfeitamente refletida), ou seja, 1.56. Para fundos irregulares, o parâmetro m a considerar será a média da inclinação dos fundos entre o ponto de rebentação e um ponto ao largo, à distância de um comprimento de onda.

CEM (Smith, 2003)

Segundo Smith (2003), no caso de uma agitação irregular, que pode ser traduzida como ondas individuais de diferentes características, o fenómeno de rebentação pode ocorrer ao longo de uma zona ampla. Na zona de rebentação (zona onde essencialmente todas as ondas rebentam), a altura de onda pode estar relacionada com a profundidade d (Equações 15 e 16).

$$H_{rms}=0.42d \quad (15)$$

$$H_s=0.60d \quad (16)$$

Por aplicação das Equações 15 e 16 obtêm-se, a raiz quadrada média (rms) da altura de onda e a altura de onda significativa máxima compatível com a profundidade.

Seelig (1979)

Seelig (1979), baseando-se nos procedimentos desenvolvidos por Goda (1975) e tendo por base ondas de carácter irregular, propôs dois métodos para previsão da altura significativa das ondas admitidas pelos fundos, na zona próximo da costa. O modelo analítico de Goda (1975) requer os seguintes pressupostos: as características da agitação ao largo são conhecidas (H_0 e T); a profundidade dos fundos é continuamente decrescente (de águas profundas para águas pouco profundas); as alturas de onda ao largo assumem a distribuição de Rayleigh; os limites de rebentação, sobrelevação e espraiamento podem ser descritos por fórmulas empíricas; o empolamento da onda é não linear e as ondas que rebentam reformulam-se em alturas de onda mais pequenas.

Como referido, os dois métodos deduzidos por Seelig (1979) permitem a previsão da altura de onda significativa máxima que poderá ocorrer no ponto em estudo (por exemplo o local de fundação da obra). No entanto, enquanto o primeiro método parte das condições de agitação ao largo para efetuar essa previsão, o segundo supõe para a estimativa da altura significativa máxima o conhecimento das condições da agitação local, medidas num outro ponto localizado em águas pouco profundas. Estes métodos baseiam-se em ábacos (Figura 2 a Figura 5), e são essencialmente a representação gráfica da variação da declividade da onda ao largo, $H_0/(gT^2)$, em função da relação entre a altura de onda significativa e a profundidade do local, H_s/d e do rácio $d/(gT^2)$.

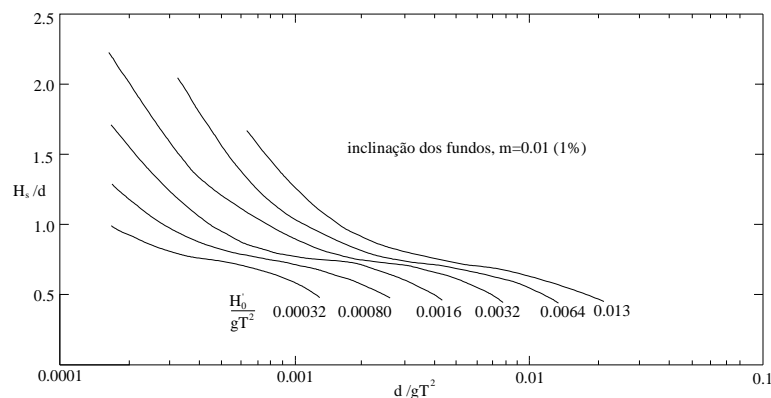


Figura 2 - Diagrama para o cálculo da altura de onda significativa para uma inclinação dos fundos de 1% (de acordo com o método de Seelig, 1979).

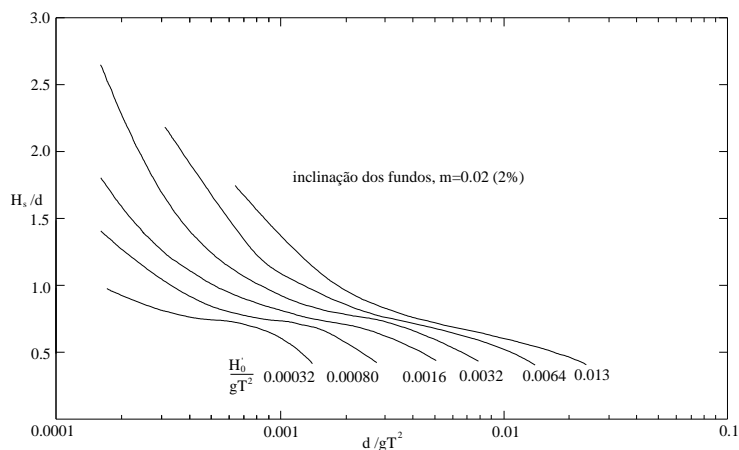


Figura 3 - Diagrama para o cálculo da altura de onda significativa para uma inclinação dos fundos de 2% (de acordo com o método de Seelig, 1979).

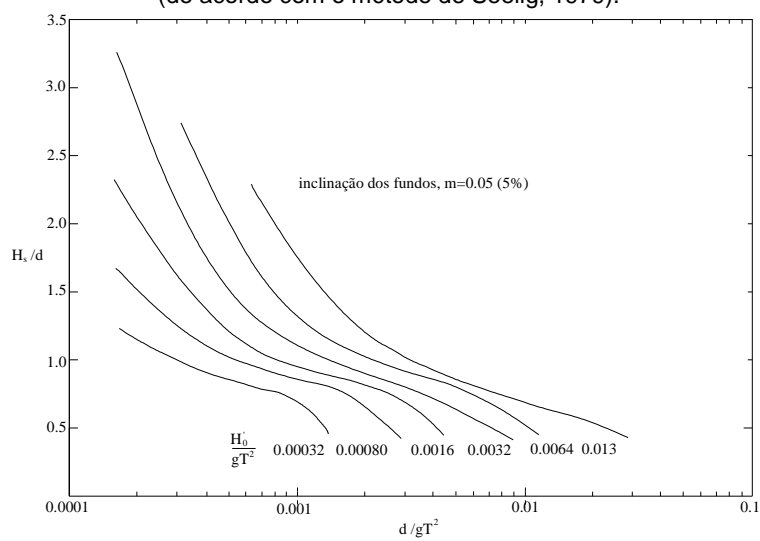


Figura 4 - Diagrama para o cálculo da altura de onda significativa para uma inclinação dos fundos de 5% (de acordo com o método de Seelig, 1979).

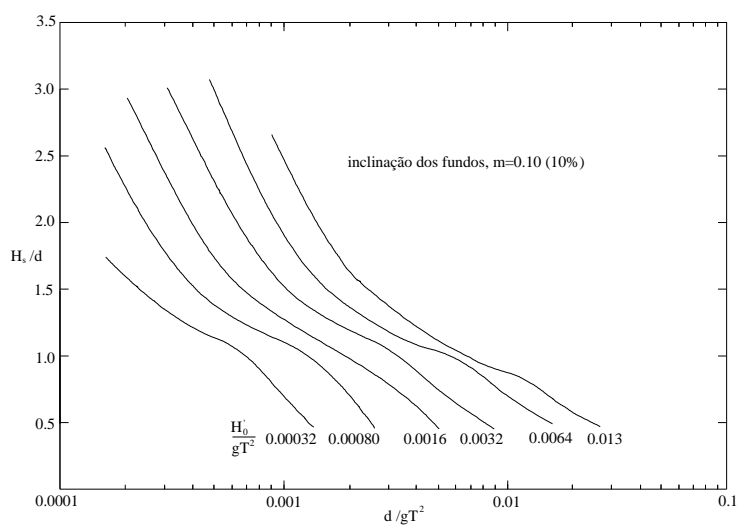


Figura 5 - Diagrama para o cálculo da altura de onda significativa para uma inclinação dos fundos de 10% (de acordo com o método de Seelig, 1979).

Goda (1985)

Segundo Goda (1985), a altura de onda significativa, H_s , e a altura de onda máxima, $H_{m\acute{a}x}$, admitidas pelos fundos na zona de rebentação, podem ser estimadas a partir das seguintes expressões matemáticas:

$$H_s = \begin{cases} K_s H_0' & :d/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0 H_0' + \beta_1 d), \beta_{m\acute{a}x} H_0', K_s H_0'\} & :d/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (17)$$

$$H_{m\acute{a}x} = \begin{cases} 1.8 K_s H_0' & :d/L_0 \geq 0.2 \\ \min\{(\beta_0^* H_0' + \beta_1^* h), \beta_{m\acute{a}x}^* H_0', 1.8 K_s H_0'\} & :d/L_0 < 0.2 \end{cases} \quad (18)$$

Sendo que K_s corresponde ao coeficiente de empolamento (consultar Goda, 1985) e L_0 , ao comprimento de onda ao largo. Os coeficientes β_0 , β_1 , $\beta_{m\acute{a}x}$, β_0^* , β_1^* e $\beta_{m\acute{a}x}^*$ são determinados em função da inclinação dos fundos, m (Tabela 1).

Tabela 1 - Coeficientes para estimar a altura de onda em águas pouco profundas, de acordo com o método de Goda (1985).

Coeficientes para H_s	Coeficientes para $H_{m\acute{a}x}$
$\beta_0 = 0.028(H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20m^{1.5}]$	$\beta_0^* = 0.052(H_0'/L_0)^{-0.38} \exp[20m^{1.5}]$
$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2m]$	$\beta_1^* = 0.63 \exp[3.8m]$
$\beta_{m\acute{a}x} = \max\{0.92, 0.32(H_0'/L_0)^{-0.29} \times \exp[2.4m]\}$	$\beta_{m\acute{a}x}^* = \max\{1.65, 0.53(H_0'/L_0)^{-0.29} \times \exp[2.4m]\}$

2.4. Onda de projeto, H_{proj} – tipo de estrutura – duração de temporais

Pita (1986) e Taveira-Pinto e Neves (2003), referem que vários autores têm procurado definir um “parâmetro equivalente”, isto é, um parâmetro obtido a partir da distribuição das alturas de onda de um registo da agitação marítima, que represente a altura H de uma agitação regular que provoque os mesmos estragos na estrutura que aquela agitação (irregular).

Durante muitos anos, considerou-se que a altura de onda significativa, seria a que melhor caracterizava um estado de agitação real, produzindo a mesma ação sobre as obras costeiras que uma onda regular (Taveira-Pinto e Neves, 2003). Pita (1978), baseando-se nos resultados de ensaios em modelo de um manto de dolos e usando em espectro empírico de Pierson-Moskowitz, refere que o parâmetro equivalente se situa num valor intermédio entre a altura máxima e a altura significativa (do tipo “média do décimo mais alto das ondas incidentes”, $H_{1/10}$, ou mesmo mais elevado).

De acordo com SPM (1975), são sugeridos três valores para a altura de onda de projeto, conforme se trata de uma estrutura rígida, de que são exemplo os quebramares verticais, semi-rígida, como por exemplo uma parede vertical de estacas-pranchas cravadas no fundo, ou deformável, como os quebramares de taludes. Os quebramares de taludes podem encontrar-se no segundo e no último grupo, caso sejam constituídos por blocos estruturalmente frágeis ou não, respetivamente. Desta forma, o SPM (1975) aconselha a tomar-se o valor de $H_{1/10}$ e a média dos períodos do terço das ondas mais altas, $T_{1/3}$, ou a altura de onda significativa, H_s , e a média dos períodos dos 20% das ondas mais altas, $T_{1/20}$, conforme se trate de uma estrutura semi-rígida ou flexível, respetivamente. Segundo Pita (1986), este procedimento justifica-se se for considerado que a ruína de um quebramar vertical é instantânea, enquanto no caso de um quebramar de talude a ruína resulta da acumulação de estragos, em geral do manto resistente. Assim, afirma-se que o parâmetro equivalente depende do tipo de comportamento da camada exterior.

Segundo Pita (1986) e Taveira-Pinto e Neves (2003), investigações vieram revelar que não existe um “parâmetro equivalente”, uma vez que o efeito progressivo da ação destrutiva das ondas não está a ser considerado. Para Pita (1986), a existência da maré pode contribuir para a importância do fator “duração da tempestade” no comportamento do manto resistente, por

provocar um “deslocamento” na zona ativa (zona mais solicitada do manto resistente). Em especial se a tempestade se iniciar em Baixa-Mar (BM), ocasionando alguns estragos no manto, é de temer que, quando se atingir a Preia-Mar (PM), e se a tempestade se mantiver violenta, ocorra um acréscimo significativo dos estragos por falta de apoio da zona inferior, anteriormente danificada.

Desta forma, a ocorrência de um temporal com uma altura de onda inferior à que foi estabelecida como H_{proj} , por exemplo, poderá colocar em risco a estabilidade da estrutura, se tiver uma duração suficiente. Sendo assim é necessário incluir a duração do temporal na definição deste parâmetro de modo a ter em consideração um período de atuação da excitação na estrutura, para que ocorram estragos e conseqüentemente ruína, por acumulação de estragos. Tenaud *et al.* (1982), propuseram uma relação para a altura de onda H que considera o efeito da duração do temporal. Essa expressão é do tipo:

$$H = f(t_d) H_{1/10} \quad (19)$$

Onde $f(t_d)$ é uma função da duração do temporal e t_d é expresso em horas. Tenaud *et al.* (1982), tendo por base ensaios com ondas irregulares e um espectro empírico JONSWAP propõem a função $f(t_d) = 0.90 t_d^{0.1}$ no caso do manto resistente da estrutura ser constituído por blocos de enrocamento e $f(t_d) = t_d^{0.05}$ para o caso de ser constituído por blocos cúbicos antifer. Analisando o comportamento dessas funções é possível concluir que para períodos de atuação da estrutura inferiores a 8 horas e 4 horas, respetivamente, a variação do tempo de excitação da estrutura tem uma influência significativa no valor final da altura de onda de projeto. Conclui-se ainda que, para $t_d = 3$ horas, para blocos de enrocamento, e 1 hora, para blocos cúbicos antifer, a altura de onda de projeto torna-se igual a $H_{1/10}$.

Os regulamentos vigentes em diversos países diferem no valor aconselhado para altura de onda de projeto. No Japão (*Design Manual for Coastal Facilities*), por exemplo, recomenda-se o uso da altura de onda significativa para um período de retorno de 50 anos, estimada a partir de dados meteorológicos recolhidos durante pelo menos 30 anos. O SPM (1984) aconselha um valor mais conservativo para a altura de onda de projeto, igual a $H_{1/10}$, juntamente com valores do coeficiente de estabilidade, K_D (relativo à fórmula de Hudson) mais baixos que os sugeridos anteriormente.

Burchart (1994), refere que tem sido considerada para a altura de onda de projeto, a altura de onda significativa correspondente a um determinado período de retorno (geralmente de 50 ou 100 anos). Losada e López (2000), sugerem a consideração da altura $H_{1/20}$ como altura de onda de projeto. Como se pode concluir, existem várias propostas para definir qual a grandeza que melhor representa a altura de onda de projeto. No entanto, a definição deste parâmetro encontra-se nas mãos do projetista, que terá de tomar em conta a sua sensibilidade e experiência na ponderação de todos os fatores em jogo. A estimativa deste parâmetro dependerá da topografia do local (influência dos fundos), do grau de estragos permitido para a estrutura, dos custos de construção, reparação e manutenção a ele associados, etc.

3. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A generalidade dos métodos apresentados na secção 2.3 permitem estimar a “altura de onda de projeto”, que interfere de forma direta no cálculo do peso dos blocos do manto resistente de obras de defesa costeira. No entanto, para uma avaliação correta deste parâmetro e conseqüentemente para um pré-dimensionamento eficaz, isto é, capaz de resistir às ações impostas com a menor quantidade de material possível, é essencial a compreensão da influência dos diferentes parâmetros envolvidos, no valor final de H_{proj} .

Assim, realizou-se um estudo de sensibilidade para cada método apresentado em 2.3, que tem como principal objetivo perceber qual a influência da variação de cada um dos parâmetros no valor final da altura de onda de projeto, bem como entender as limitações de cada um dos métodos de modo a que seja possível identificar quais destes transmitem um maior grau de confiança e fiabilidade.

De seguida, descrevem-se as considerações efetuadas na análise de sensibilidade e apresentam-se graficamente alguns dos resultados obtidos. Por fim são discutidos e analisados esses resultados.

3.1. Pressupostos de cálculo

Os métodos apresentados na secção 2.3 têm como principal objetivo a estimativa do valor da altura máxima, $H_{m\acute{a}x}$, e/ou significativa máxima, H_s , de uma onda regular e/ou irregular, admitida por uma dada profundidade. Verifica-se que a inclinação dos fundos, a altura de onda ao largo, o coeficiente de empolamento, refração e difração e a profundidade do local são parâmetros intervenientes em alguns dos métodos de cálculo indicados.

A profundidade do local é um parâmetro comum a todos os métodos apresentados anteriormente. Para uma melhor compreensão da sua influência na altura de onda de projeto foi avaliado o comportamento considerando profundidades num intervalo entre 1 e 15 metros. Quando necessária a consideração do período de onda ao largo, foi admitida a Equação 20, deduzida por Coelho (2005).

$$T_0 = 1.21H_0 + 6.92 \quad (20)$$

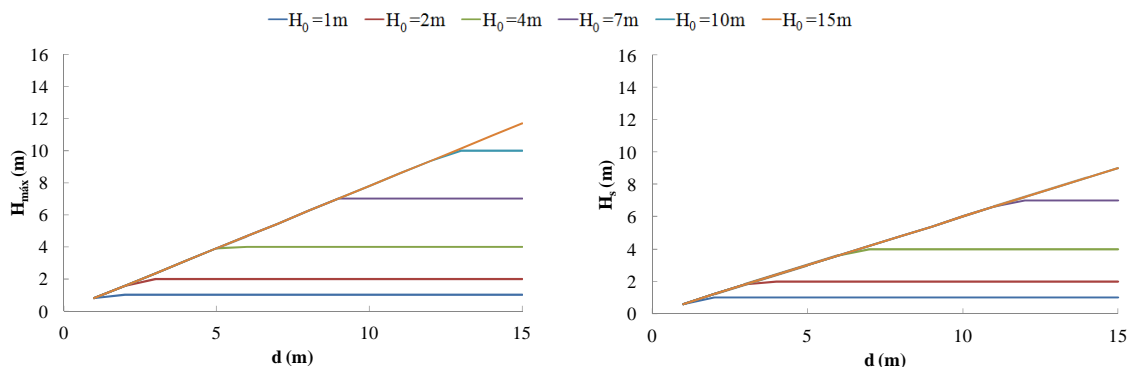
Foram ainda considerados para o parâmetro H_0 os valores 1, 2, 4, 7, 10 e 15 metros e para o parâmetro m , que representa o efeito da inclinação dos fundos, considerou-se os valores de 1, 2, 5 e 10%.

Para avaliar a influência da inclinação dos fundos no valor final da altura de onda, fez-se variar a altura de onda máxima e/ou significativa máxima em função da profundidade, d , para os 4 valores de m , fixando o parâmetro H_0 . Num segundo caso, para avaliar o efeito da altura de onda ao largo no comportamento de $H_{m\acute{a}x}$ e/ou H_s em função da profundidade, foram definidos 6 valores diferentes de H_0 , fixando o parâmetro m . Assim, para o primeiro caso obtêm-se 6 gráficos, correspondentes a cada valor de H_0 pré-estabelecido e para o segundo caso, 4 gráficos, correspondentes aos 4 valores distintos de m .

Por último, em todos os métodos aplicados, considerou-se para efeitos de simplificação do exercício, que a onda ao largo propaga-se sem obstáculos e paralelamente à costa ($K_G=1$ e $K_r=1$), o que torna a altura de onda ao largo igual à altura de onda ao largo equivalente.

3.2. Resultados

Teoria da onda solitária e CEM (Smith, 2003)



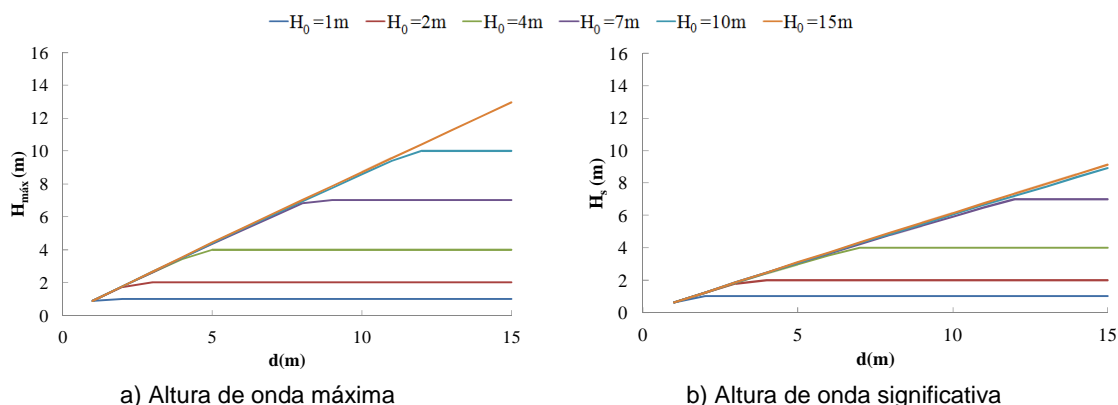
a) Recorrendo à teoria da onda solitária.

b) Recorrendo ao método de CEM.

Figura 6 - Altura de onda máxima e significativa, respetivamente, em função da profundidade, d , para diferentes valores de H_0 .

A teoria da onda solitária e o método de CEM consideram que a altura de onda incidente que poderá atingir uma estrutura é apenas condicionada pela profundidade do local, não tendo em conta parâmetros hidrodinâmicos característicos das condições de agitação ao largo. Por interpretação da Figura 6 é possível concluir que quanto maior é o valor da altura de onda ao largo, maior será a profundidade de rebentação da onda regular e irregular, respetivamente, registando-se a existência de uma envolvente para a qual tendem as curvas correspondentes a diferentes valores de H_0 . Essa envolvente representa a curva correspondente ao valor da altura de onda local, condicionada pelo fenómeno de rebentação, para cada valor da profundidade do local considerado.

Crítério de Miche (1951)



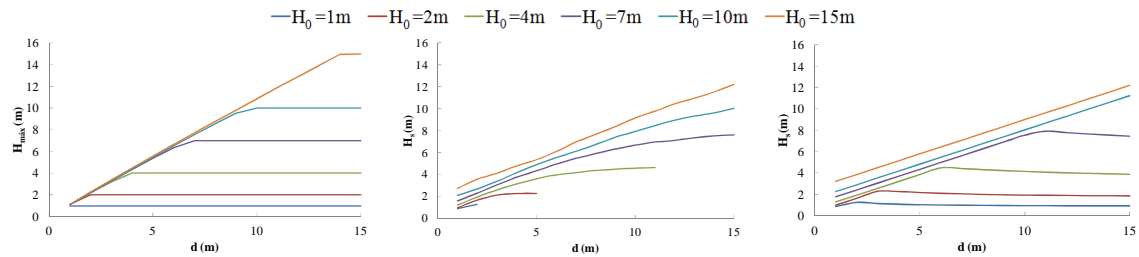
a) Altura de onda máxima
 b) Altura de onda significativa
 Figura 7 - Altura de onda em função da profundidade, d , para diferentes valores de H_0 , recorrendo ao critério de Miche (1951) para ondas regulares e irregulares.

No estudo de sensibilidade para o critério de Miche (1951) foram analisadas as Equações 4 (Figura 7a) e 8 (Figura 7b), para ondas regulares e irregulares, respetivamente. Em comparação com a teoria da onda solitária, o critério de Miche (1951), acrescenta parâmetros intervenientes no cálculo H_s e/ou $H_{\text{máx}}$, nomeadamente parâmetros relativos às condições da agitação ao largo e locais. Este facto modifica o comportamento geral das curvas da Figura 6a, obtendo-se um acréscimo na ordem de 10 a 14% no valor final da altura de onda máxima, conforme representado na Figura 7a. Por interpretação do comportamento das curvas das Figura 7a e Figura 7b conclui-se que para alturas de onda superiores a 15 metros e 10 metros, respetivamente, profundidades do local inferiores a 15 metros têm grande influência no cálculo final da altura de onda admitida pelos fundos.

Método de Weggel (1972), Seelig (1979) e Goda (1985)

Nos métodos de Weggel (1972), Seelig (1979) e Goda (1985), foi analisada a influência da inclinação dos fundos, m , e da altura de onda ao largo, H_0 , no valor da altura de onda máxima e significativa máxima admitida pelos fundos em função da profundidade do local. As Figuras 8 e 9 representam essa influência, para os casos particulares de uma inclinação dos fundos de 5% (Figuras 8a, 8b e 8c) e para uma altura de onda ao largo de 7 metros (Figuras 9a, 9b e 9c), respetivamente.

o Influência da altura de onda ao largo



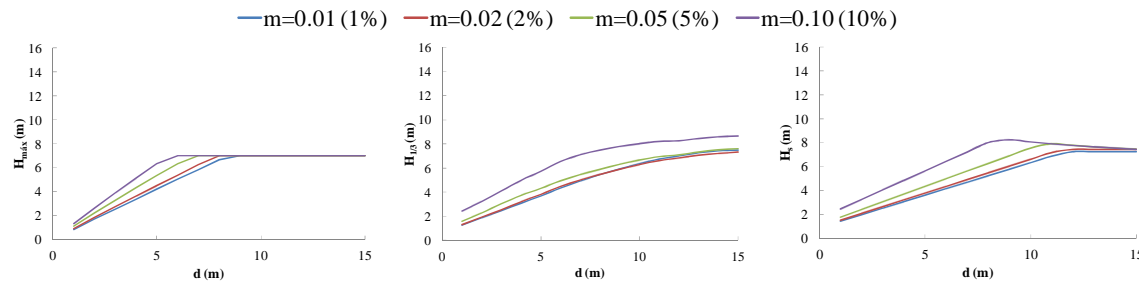
a) $m=5\%$, recorrendo ao método de Weggel (1972)

b) $m=5\%$, recorrendo ao método de Seelig (1979)

c) $m=5\%$, recorrendo ao método de Goda (1980)

Figura 8 - Variação da altura de onda significativa em função da profundidade, d para diferentes valores de H_0 .

o Influência da inclinação dos fundos



a) $H_0=7m$, recorrendo ao método de Weggel (1972)

b) $H_0=7m$, recorrendo ao método de Seelig (1979)

c) $H_0=7m$, recorrendo ao método de Goda (1980)

Figura 9 - Variação da altura de onda significativa em função da profundidade, d , para diferentes valores de m .

3.3. Discussão

Uma vez apresentadas as análises de sensibilidade realizadas, na presente secção avaliam-se e interpretam-se os resultados obtidos, primeiramente numa perspetiva global, mais genérica, e depois de forma individual, avaliando o comportamento específico de alguns métodos.

No estudo da influência dos vários parâmetros envolvidos nas formulações e ábacos apresentados, propostos com o objetivo de determinar a altura de onda condicionada pelos fundos, verificou-se que a inclinação dos fundos, m , as características da agitação ao largo (H_0 e T_0), os fenómenos de transformação da onda (empolamento, difração e refração) e a profundidade do local são os principais fatores intervenientes. No entanto, nem todos os métodos aqui apresentados, consideram todos estes parâmetros em simultâneo, e nem todos são aplicáveis para a caracterização de ondas de carácter irregular, pelo que na comparação dos resultados é necessário ter em atenção os limites de aplicabilidade de cada um.

Assim sendo, no que diz respeito ao carácter regular/irregular da agitação conclui-se, através dos resultados obtidos pelo método de Weggel (1972), deduzido para ondas monocromáticas, que este resulta em valores significativamente mais baixos para a altura de onda máxima, $H_{m\acute{a}x}$, comparativamente com o método de Goda (1985), deduzido para ondas irregulares. No entanto, ambos confirmam a tendência do aumento da altura de onda para valores crescentes de inclinação dos fundos.

Comparando os métodos de Weggel (1972) e Seelig (1979) através da relação $H_{m\acute{a}x}=(1.6 \leftrightarrow 2.0) H_s$, concluiu-se, de forma análoga ao método de Goda (1985), que o método de Seelig (1979) apresenta resultados muito superiores para altura de onda significativa, em todas as condições de análise (para diferentes valores de H_0 e de m).

Relativamente aos resultados obtidos pelos métodos de Seelig (1979) e Goda (1985) verifica-se que a percentagem de variação entre ambos é relativamente baixa (até 8%) para declives dos fundos acentuados ($m=10\%$), enquanto para inclinações mais suaves a relação entre estes aumenta, atingindo os 18% de variação. Complementarmente, por comparação dos resultados obtidos por estes dois métodos, com os valores obtidos por aplicação do critério de Miche (ondas irregulares, Equação 8) conclui-se, para a generalidade dos casos, que este último conduz a valores mais baixos da altura de onda significativa. No entanto, a relação entre os resultados do método de Goda e do critério de Miche, para alturas de onda ao largo igual a 1, 2 e 4 metros e profundidades superiores a 7, 9 e 13, respetivamente, demonstra ser o critério de Miche o mais conservativo na estimativa da altura de onda, devido ao fenómeno de empolamento considerado pelo método de Goda.

De entre os vários métodos que não têm em consideração o parâmetro m , salientam-se a teoria da onda solitária, o método de CEM (Smith, 2003) e o critério de Miche (1951). Pela análise dos resultados obtidos, verifica-se que a teoria da onda solitária traduz sempre valores mais baixos de $H_{m\acute{a}x}$ comparativamente com os valores obtidos pelo método de Goda (ondas irregulares), critério de Miche (ondas regulares, Equação 4) e método de Weggel (ondas regulares). Desta forma, conclui-se que a aplicação da teoria da onda solitária na estimativa da onda de projeto, H_{proj} , conduz a um subdimensionamento do peso dos blocos do manto resistente, W , da estrutura de defesa costeira.

Por outro lado, verifica-se em comparação com o método de Goda (Equação 17), de Seelig (1979) e o critério de Miche (ondas irregulares), que o método de CEM (Smith, 2003) resulta também em valores mais baixos de H_s , na generalidade dos casos. No entanto este método apresenta, para o caso de profundidades mais elevadas (entre 6 e 15 metros) e alturas de onda ao largo mais baixas (entre 1 e 4 metros), valores superiores de H_s comparativamente com o método de Goda (1985), devido essencialmente ao fenómeno de empolamento da onda considerado por este último método.

Finalmente, comparam-se os resultados obtidos pelo método de Weggel (1972) e o critério de Miche (1972), deduzidos para ondas regulares. Da análise efetuada verifica-se que a relação entre ambos é variável (essencialmente devido ao fato do critério de Miche não ter em conta o parâmetro m). Para inclinações dos fundos igual a 1% o critério de Miche apresenta resultados superiores relativamente ao método de Weggel, enquanto para valores de m superiores, a situação inverte-se. De referir que, quanto maior o valor da inclinação dos fundos, maior a percentagem de variação entre estes métodos (atingindo o valor máximo de percentagem de variação de 52% para baixas profundidades e $m=10\%$).

De salientar que, para os vários métodos de cálculo apresentados, um aumento da inclinação dos fundos e da altura de onda ao largo provoca um acréscimo no valor final da altura de onda máxima e/ou significativa máxima admitida por estes.

Método de Weggel (1972)

Na generalidade dos casos analisados, para condições de agitação ao largo iguais e inclinações dos fundos a variar entre 1 e 10% conclui-se a não linearidade da influência de m no valor final de $H_{m\acute{a}x}$. Por observação da Tabela 2 verifica-se que, para valores mais baixos do parâmetro m (entre 1 a 5%), o máximo acréscimo percentual no valor final da altura de onda máxima varia no intervalo de 5 a 32%, enquanto para inclinações mais acentuadas, isto é, entre 5 e 10%, o máximo desse incremento é de 20%. Esta gama de valores percentuais deve-se essencialmente à influência da profundidade local e da altura de onda ao largo, sendo possível verificar que valores de H_0 mais elevados e d menores conduzem a percentagens de variação mais elevadas. Assim, conclui-se, por aplicação do método de Weggel (1972), que a influência do parâmetro m aumenta com a diminuição da profundidade local e inclinação dos fundos e com o acréscimo do valor da altura de onda ao largo.

Tabela 2 - Percentagem de variação entre os resultados obtidos para a altura de onda máxima, para inclinações dos fundos de 1 e 5% e 5 e 10% (utilizando o método de Weggel, 1972).

d (m)	Relação de valor $H_{m\max m=5\%}/H_{m\max m=1\%}$						Relação de valor $H_{m\max m=10\%}/H_{m\max m=5\%}$					
	H_0 (m)						H_0 (m)					
	1	2	4	7	10	15	1	2	4	7	10	15
1	18	29	31	31	32	32	0	19	20	20	20	20
2	0	19	29	30	31	32	0	0	19	20	20	20
3	0	0	27	29	30	31	0	0	18	19	20	20
4	0	0	19	28	30	31	0	0	0	19	19	20
5	0	0	0	27	29	30	0	0	0	18	19	20
6	0	0	0	26	28	30	0	0	0	10	19	19
7	0	0	0	20	28	30	0	0	0	0	18	19
8	0	0	0	5	27	29	0	0	0	0	17	19
9	0	0	0	0	26	29	0	0	0	0	5	19
10	0	0	0	0	19	28	0	0	0	0	0	19
11	0	0	0	0	9	28	0	0	0	0	0	18
12	0	0	0	0	0	28	0	0	0	0	0	16
13	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	8
14	0	0	0	0	0	27	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0

Método de Seelig (1979)

Conforme referido anteriormente, o método de Seelig (1979) baseia-se em 4 ábacos correspondentes a 4 valores diferentes da inclinação dos fundos, m . Na análise de comportamentos efetuada verifica-se que, para casos em que a altura de onda ao largo, H_0 , é inferior a 7 metros (exclusive), os ábacos não são aplicáveis para profundidades superiores a 2.0 a 2.75 vezes a altura de onda ao largo. Isto deve-se ao fato do efeito dos fundos só se fazer sentir para profundidades inferiores. Acrescenta-se ainda que, no caso de inclinações dos fundos igual a 10%, as alturas de onda ao largo de 10 e 15 metros não atingem profundidades inferiores a 1 metro (rebentam antes), sendo por este motivo o método de Seelig não aplicável a essas profundidades.

No que se refere à influência de m , concluiu-se que o acréscimo no valor final da altura significativa admitida pelos fundos não é linear, isto é, para gamas de inclinação dos fundos elevadas, entre 5% e 10%, o aumento de H_s é mais significativo, do que quando consideradas gamas mais baixas (Tabela 3). No primeiro caso (valores de m entre 1 e 5%), até profundidades aproximadamente iguais ao valor da altura de onda ao largo, o valor máximo desse acréscimo varia entre 11 e 37% enquanto no segundo (valores de m entre 5 a 10%) o acréscimo é de cerca de 26% e 53% (sendo as maiores percentagens correspondentes a profundidades locais baixas e valores de H_0 elevados). Para profundidades superiores ao valor da altura de onda ao largo, a influência de m diminui significativamente.

Contrariamente ao que acontece com o método de Goda (1985) e Weggel (1972), os resultados obtidos por este método mostram que existe um intervalo de H_0 , nomeadamente, entre 2 e 7 metros, para as quais, a partir de profundidades aproximadamente da mesma ordem de grandeza que H_0 , os valores de H_s para inclinações de fundo de 1%, são superiores aos valores da altura da onda para m igual a 2%. Para valores em que H_0 é superior a 7 metros, o valor final da altura significativa assume-se proporcional à inclinação dos fundos.

Tabela 3 - Percentagem de variação entre os resultados obtidos para a altura de onda significativa, para inclinações dos fundos de 1 e 5% e 5 e 10% (utilizando o método de Seelig, 1979).

d (m)	Relação de valor $H_{sm=5\%}/H_{sm=1\%}$						Relação de valor $H_{sm=10\%}/H_{sm=5\%}$					
	H_0 (m)						H_0 (m)					
	1	2	4	7	10	15	1	2	4	7	10	15
1	17	20	22	25	34	37	27	34	46	53		
2	12	17	23	22	24	32	14	28	34	42	51	45
3		14	17	24	24	26		13	33	35	41	46
4		8	12	21	25	26		11	30	33	34	42
5			9	17	24	24		13	25	33	33	38
6			6	14	21	23			20	32	32	35
7			4	11	18	23			16	30	31	34
8			3	8	16	22			14	27	31	33
9			2	7	14	21			14	23	31	31
10			4	5	13	20			13	20	29	30
11				3	12	19			12	18	26	29
12				2	11	18				16	23	29
13				1	10	16				15	21	29
14				2	9	16				14	19	28
15				2	8	15				14	17	27

Método de Goda (1985)

No método de Goda (1985), foi analisada a influência da inclinação dos fundos, m , e da altura de onda ao largo, H_0 , no valor da altura máxima (Equação 18) e significativa máxima (Equação 17) admitida pelos fundos em função da profundidade do local. Concluiu-se de uma maneira geral que, para as mesmas condições de agitação ao largo e inclinações entre 1 e 5%, o máximo aumento percentual no valor final da altura de onda significativa máxima é de cerca de 22% (Tabela 4) enquanto para inclinações maiores, isto é, entre 5 e 10% o acréscimo é de 30 a 45% (percentagem definida consoante a altura de onda ao largo e profundidade local considerada). Assim, conclui-se que quanto maior o valor de m , maior será a influência dos fundos no valor final da altura de onda significativa, H_s .

Tabela 4 - Percentagem de variação entre os resultados obtidos para a altura de onda significativa, para inclinações dos fundos de 1 e 5% e 5 e 10% (utilizando o método de Goda, 1985).

d (m)	Relação de valor $H_{sm=5\%}/H_{sm=1\%}$						Relação de valor $H_{sm=10\%}/H_{sm=5\%}$					
	H_0 (m)						H_0 (m)					
	1	2	4	7	10	15	1	2	4	7	10	15
1	19	20	20	21	21	22	30	33	37	41	43	45
2	0	19	20	20	21	21	0	29	32	36	39	41
3	0	19	19	20	20	21	0	6	30	33	36	39
4	0	1	19	20	20	20	0	0	29	32	34	37
5	0	0	19	19	20	20	0	0	23	30	32	35
6	0	0	19	19	20	20	0	0	2	29	31	34
7	0	0	6	19	19	20	0	0	0	29	31	33
8	0	0	4	19	19	20	0	0	0	28	30	32
9	0	0	1	19	19	20	0	0	0	20	29	32
10	0	0	0	19	19	19	0	0	0	7	29	31
11	0	0	0	15	19	19	0	0	0	0	28	31
12	0	0	0	7	19	19	0	0	0	0	28	30
13	0	0	0	5	19	19	0	0	0	0	19	30
14	0	0	0	4	19	19	0	0	0	0	10	29
15	0	0	0	3	19	19	0	0	0	0	3	29

Em alguns dos gráficos obtidos (correspondentes a diferentes valores de H_0) foi possível verificar a existência de um pico para o valor da altura de onda significativa máxima admitida pelos fundos (com exceção de ondas com $H_0 = 15$ m). Este pico representa o valor máximo da

altura de onda significativa que ocorre em toda a zona de rebentação e é visível para alturas de onda até 4 metros (inclusive) para todas as inclinações dos fundos estudadas.

No caso particular de alturas de onda ao largo iguais a 7 metros, Figura 8c, verifica-se que para inclinações mais baixas (até 2%) esse máximo deixa de ser visível para profundidades até 15 metros, tomando um valor constante a partir de 12 metros de profundidade.

Para $H_0 = 10$ m verifica-se que o valor de pico da altura de onda significativa é apenas visível para inclinações de 10%. Desta forma, deduz-se que para alturas de onda ao largo superiores a 10 metros o valor máximo da altura de onda significativa que ocorre na zona de rebentação acontece para profundidades superiores a 15 metros.

No que respeita à altura de onda máxima admitida pelos fundos, $H_{m\acute{a}x}$ (Equação 18) os resultados obtidos na análise de sensibilidade mostram que $H_{m\acute{a}x} = 1.3 \leftrightarrow 1.8 H_s$ (consoante a altura de onda ao largo e profundidade considerada). No entanto, não é possível estabelecer uma relação de proporcionalidade entre a relação $H_{m\acute{a}x}/H_s$ e o parâmetro m . Verifica-se também que esta relação não varia linearmente com a altura de onda ao largo.

4. CONCLUSÕES

A altura de onda de projeto é um parâmetro essencial ao pré-dimensionamento de estruturas costeiras de talude. O cálculo de H_{proj} é influenciado por diversos fatores, entre os quais se destacam, a duração da tempestade, o regime de extremos e a batimetria/topografia do local de implantação da obra e a respetiva profundidade, inclinação dos fundos, tipo de comportamento do manto resistente, etc.

No caso de estruturas situadas em águas profundas, podendo estar sujeitas a elevados níveis energéticos de agitação, a profundidade deixa de ter influência no valor final da altura de onda de projeto, sendo esta associada, em geral, a períodos de retorno de 50 ou 100 anos (consoante a importância da obra), através da análise e extrapolação dos dados disponíveis, aplicando uma ou mais distribuições estatísticas aceites como representativas da distribuição a longo prazo da altura das ondas. No entanto, é frequente não existirem esses dados, em particular de medições de bóias, em quantidade e qualidade suficientes, podendo nesses casos utilizar-se o ONDATLAS (atlas das ondas em Portugal). Contrariamente, quando as estruturas se situam a pequenas profundidades, as alturas de onda que atingem a estrutura estão limitadas por condicionantes relacionadas com as características dos fundos. Para este caso, foram descritos vários métodos desenvolvidos no âmbito de uma agitação regular e irregular, no sentido de se estabelecer uma relação entre os fundos e as alturas das ondas que os podem atingir, tendo por base o fenómeno de propagação e rebentação.

Realizou-se uma análise de sensibilidade aos diversos métodos, verificando-se, de uma maneira geral que um incremento da declividade da onda e da inclinação dos fundos influencia de forma direta e proporcional o valor final da altura de onda condicionada pelo local, e que esta influência é mais significativa nos métodos que têm por base uma agitação irregular (à exceção do método de CEM, que não tem em consideração estes parâmetros, e Miche, que apenas considera o efeito da altura de onda ao largo). Verificou-se ainda, para os três métodos apresentados que têm em conta a inclinação dos fundos (Weggel, 1972, Seelig, 1979 e Goda, 1985), que a influência deste parâmetro no valor da altura de onda vai diminuindo à medida que a profundidade do local aumenta, assumindo-se mais significativa para inclinações dos fundos maiores (5 e 10%), à exceção do método de Weggel (1972).

No que respeita aos resultados obtidos para ondas regulares e irregulares verificou-se que os segundos apresentavam valores superiores aos primeiros, no caso de ser considerado o valor do parâmetro m . Concluiu-se ainda que o método da teoria da onda solitária na estimativa da altura de onda de projeto conduz a um subdimensionamento do peso dos blocos do manto resistente, uma vez que este apresentava valores mais baixos comparativamente com os resultados obtidos por outros métodos. Da mesma forma, concluiu-se também que os métodos de Seelig (1979) e Goda (1985) seriam os mais representativos na estimativa da altura de onda, uma vez que estes para de além de apresentarem resultados relativamente próximos entre si e superiores aos restantes métodos, têm por base ondas irregulares, o que vai de encontro com a realidade da agitação marítima.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R., Pontes, T., Pires, H. (2003).** Ondatlas - Atlas de Ondas em Portugal. 3^{as} Jornadas de Engenharia Costeira e Portuária, Aveiro 2003, 12 p.
- Burcharth, H. (1994).** The Design of Breakwaters, Coastal, Estuarial and Harbour Engineers' Reference Book, M. B. Abbot e W. A. Price, Londres, Reino Unido, 381-424. Citado por Taveira-Pinto e Neves (2003).
- Capitão, R., Conceição, J., Mendes de Carvalho, M., Covas, J. (1999).** Definição de Regimes de Agitação Marítima – Casos de Estudo, AIPCN/PIANC, Comunicação das 1^{as} Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária 1999, Porto, 31-34. Citado por Taveira-Pinto e Neves (2003).
- Coelho, C. (2005).** Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira. Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 405 p.
- CONSULMAR (2011).** Empreitada de construção de obra marítima de abrigo na zona piscatória de Angeiras. Volume 3 - Projeto de Execução, 43 p.
- Fleming, C., Allsop, N., Leeming, M., Sharp, B., Slater, D., Williams, A., Titman, P. (1998).** Concrete in Coastal Structures. Thomas Telford, London, pp 41-65.
- Goda, Y. (1985).** Random Seas and Design of Maritime Structures. Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 15, pp 85-95.
- Goda, Y. (1975).** "Irregular Wave Deformation in the Surf Zone," Coastal Engineering in Japan, Vol. 18, pp 13-26.
- Losada, M., López, C. (2000).** Mound breakwater stability versus wave reflection, *Coastal Structures '99*, Santander, Espanha, Inigo J. Losada, Balkema, Vol. 1, 283-288. Citado por Taveira-Pinto e Neves (2003).
- McCowan (1891).** "On the Solitary Wave," *Philosophical Magazine*, 5th Series, Vol 36, pp 430-437. Citado por Smith (2003).
- Miche, M. (1951).** "Le Pouvoir Réfléchissant des Ouvrages Maritimes Exposés à l'Action de la Houle," *Annals des Ponts et Chaussées*, 121^e Année, pp 285-319 (translated by Lincoln and Chevron, University of California, Berkeley, Wave Research Laboratory, Series 3, Issue 363, June 1954).
- Piccinini, F. (2006).** A onda de projeto por meio de análise estatística de extremos a partir de dados medidos por satélite. Revista Pesquisa Naval, Brasília, N.19, pp 84-90.
- Pita, C. (1978).** Porto de Sines. Molhe Oeste. Ensaios de Estabilidade e Galgamento em Canal de Ondas Irregulares. Relatório II. Relatório, LNEC, Fevereiro de 1978. Citado por Pita (1986).
- Pita, C. (1986).** Dimensionamento Hidráulico do Manto Resistente de Quebra-Mares de Talude. Memória n^o 670, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 68 p.
- Pita, C. (1985).** Considerações sobre a Observação de Quebra-Mares de Talude. Memória N^o 647, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 17 p.
- RBRH (1999).** Uma formulação explícita para a solução de escoamentos em águas rasas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 4, n.4, pp 63-73.
- Seelig, W. (1979).** Estimating Nearshore Significant Wave Height for Irregular Waves. Coastal Engineering Technical Aid No.79-5, 24 p.
- Smith, J. (1999).** Wave Breaking on an Opposing Current. Coastal Engineering Technical Note IV-17. US Army Corps of Engineers.
- Smith, J. (2003).** Surf Zone Hydrodynamics. Coastal Engineering Manual, Part II: Design of Coastal Project Elements, Chapter 4, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC, 22 p.
- SPM (1975).** Shore Protection Manual. 2nd Edition, CERC.
- Taveira-Pinto, F. A. (2001).** Análise das Oscilações e dos Campos de Velocidades nas proximidades de Quebramares Submersos sob a Acção da Agitação Marítima. Tese de Doutoramento, FEUP, 351 p.
- Taveira-Pinto, F., Neves, A. (2003).** A Importância da Consideração do Carácter Irregular da Agitação Marítima no Dimensionamento de Quebramares de Taludes. N.º 16, pp 95-111.
- Tenaud, R., Coefe, Y., Feillet, J. (1982)** Le Dimensionnement des Digues a Talus, Prise en Compte du Caractère Aléatoire de la Houle, *LNH*, Chatou.
- Weggel J. R. (1972).** "Maximum Breaker Height," *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, Vol 98, No. WW4, pp 529-548. Citado por Smith (2003).