

Análise Experimental do Comportamento de Quebramares Submersos

Francisco Taveira-Pinto, Maria Fernanda Proença, Fernando Veloso-Gomes
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
Instituto de Hidráulica e Recursos Hídricos
Rua dos Bragas, 4050 – 123 Porto
Tel: 204 19 66/205 08 70, Fax: 205 08 70
E-mail: fpinto@fe.up.pt; mfernanda@fe.up.pt; vgomes@fe.up.pt

SUMÁRIO

O comportamento de quebramares submersos sujeitos à agitação marítima pode ser avaliado através do conhecimento das alterações que provocam, nomeadamente a reflexão e a transmissão. Estes fenómenos podem ser quantificados em função da energia de onda incidente, reflectida e transmitida, por unidade de largura da crista, que são em cada caso a soma da energia cinética e potencial. A energia cinética pode ser determinada em função da velocidade total e a energia potencial em função da elevação da superfície livre.

Com este trabalho pretende-se apresentar as medições efectuadas no tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, usando diferentes tipos de modelos de quebramares submersos. Estas medições, utilizando a técnica da Anemometria Laser-Doppler, permitiram obter os valores das energias indicadas para as várias situações de teste e determinar os correspondentes valores dos coeficientes que permitem caracterizar o efeito dissipativo do quebramar submerso, quando submetido à agitação regular.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Dissipação da energia da agitação

Diversas estruturas podem ser utilizadas para a defesa da linha de costa, tais como quebramares destacados, esporões ou estruturas aderentes de taludes, em combinação com operações de alimentação artificial com areias. Nas últimas décadas, engenheiros e cientistas têm procurado encontrar novas soluções que provoquem menores impactes ambientais e paisagísticos, Figura 1.

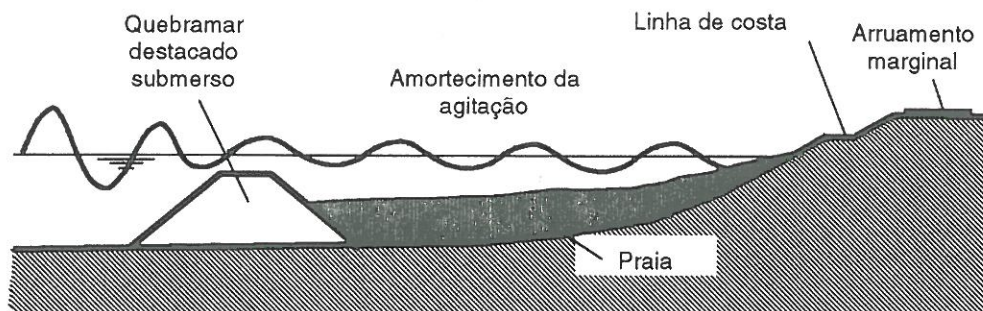


Figura 1 – Diagrama da função de protecção de um quebramar submerso. A praia formar-se-à por efeito de tómbolo e/ou por alimentação artificial.

Os quebramares destacados submersos poderão ser uma das soluções possíveis para minorar os problemas de erosão costeira facilitando a acumulação de areia, se o transporte litoral existir ou a retenção de areia no caso de se proceder à alimentação artificial da praia. Devido à baixa cota da sua crista, não eliminam a circulação em direcção à praia e podem ser utilizados com êxito em alguns casos. A sua eficiência depende da relação entre a altura de onda incidente e as correspondentes alturas de onda reflectidas e transmitidas, de forma a ser atingida a protecção desejada. Esta eficiência pode variar acentuadamente com a variação das cotas de água por acção das marés.

Para a mesma situação, os quebramares destacados são normalmente implantados em profundidades idênticas ou superiores às profundidades das extremidades dos esporões, podendo constituir um processo eficiente para interceptar o transporte litoral e atenuar a agitação incidente. O seu funcionamento resulta da dissipação da energia das ondas e das correntes de difracção geradas nas extremidades do quebramar, originando a deposição das areias atrás deste. A partir de determinado "enchimento" restabelece-se o transporte litoral normal, deixando de se sentir o efeito do quebramar destacado.

Da interpretação dos fenómenos ocorridos verifica-se que a redução da altura de onda após "ultrapassar" o quebramar, na zona de influência do mesmo, conduz a uma diminuição da capacidade de transporte sólido litoral. Essa redução da capacidade de transporte é a responsável pela deposição de areia nas costas do quebramar e, conjuntamente com as correntes de difracção geradas, pela eventual formação de um tómbolo.

Como os quebramares destacados, submersos ou não, são um obstáculo à normal propagação da agitação marítima incidente, contribuem significativamente para a sua alteração. Estas estruturas de taludes, em geral porosas, projectadas para proteger zonas costeiras expostas, cumprem essa função como resultado da complexa interacção entre a agitação incidente e a estrutura.

A complexidade dessa interacção deve-se essencialmente à variabilidade das propriedades das estruturas, quer em relação à reflexão, quer em relação à fricção com a estrutura permeável. Daí que os fenómenos verificados com maior significado devido à presença dessas estruturas sejam a reflexão da agitação, a transmissão da energia através do meio poroso que é o quebramar e a redução da energia da onda transmitida sobre o quebramar destacado, no caso de ser submerso.

O dimensionamento de quebramares situados em águas profundas e com elevados níveis energéticos é particularmente difícil. Enquanto que no caso de quebramares situados em águas pouco profundas as alturas de onda limites que podem atingir a obra 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 intervalos de ocorrência, exigindo séries estatísticas locais relativamente longas.

Face à insuficiência em relação a estes dados e à capacidade de previsão, a segurança da estrutura só poderá ser garantida à custa de uma grande reserva de resistência, o que a torna excessivamente cara e de construção muito difícil. Compreende-se assim que se tornem atractivas as soluções que permitam limitar a máxima altura de onda que podem atingir certas estruturas. Essa limitação é normalmente conseguida pela construção de um quebramar submerso (isto é, um quebramar cuja cota de coroamento é inferior ao nível da baixa-mar mais baixa previsível no local) a uma certa distância da estrutura principal (quebramar principal ou obra marginal).

Este quebramar apenas funciona para ondas de altura superior a um dado limite (função da cota de coroamento, do comprimento da onda, largura da crista, etc.), que rebentam ao passar sobre ele. Como se trata de uma obra submersa é menos solicitada pela agitação que a atinge, o que permite que na sua construção se empreguem blocos de menor peso. O quebramar principal ou a estrutura marginal pode ser aligeirado, dada a redução das alturas de onda máximas que o podem atingir.

É fundamental verificar neste tipo de estruturas, os seguintes aspectos: comprimento do quebramar, distância à linha de costa; profundidade da água; afastamento entre quebramares,

tipo de estrutura, altura do coroamento relativamente ao nível de preia-mar, deposição de areia e formação de tómbolos.

A altura do coroamento de um quebramar é também um parâmetro condicionante da sua eficiência. É evidente que essa eficiência é tanto maior, quanto menor forem os galgamentos que ele permite. Do ponto de vista estético e económico, essa altura deverá ser relativamente baixa. Quando a amplitude de maré é considerável, a construção de um quebramar pode conduzir a que grande parte da energia remanescente altere o processo de deposição de areias atrás do quebramar, não permitindo o bom funcionamento deste.

1.1.1 Reflexão

A reflexão da agitação devido à presença de quebramares submersos corresponde a uma parte significativa da energia total dissipada. O aumento das velocidades da água provocado pela reflexão pode agravar substancialmente a erosão de praias e a estabilidade de algumas estruturas pode ser ameaçada pelo arrastamento do material da fundação. O custo de construção de quebramares submersos é muito sensível ao ângulo dos taludes.

Várias experiências têm sido realizadas em laboratório para previsão da reflexão da agitação provocada por estruturas. As expressões teóricas obtidas são, em geral, função da geometria da estrutura, em particular da inclinação dos taludes e da relação entre a altura de onda reflectida e incidente, H_{sr} e H_{si} , ou seja,

$$C_r = \frac{H_{sr}}{H_{si}} \quad (1)$$

através do parâmetro de rebentação ou número de Iribaren, I_r ,

$$I_r = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_{si}/L_o}}, \quad (2)$$

em que β é o ângulo do talude da estrutura e L_o é o comprimento de onda em águas profundas ($gT^2/2\pi$), correspondente ao período da onda, T .

O coeficiente de reflexão também depende da porosidade e rugosidade da estrutura e da profundidade relativa da água, d/L , sendo d e L , a profundidade da água e o comprimento da onda no local da estrutura, respectivamente.

As expressões teóricas de variação do coeficiente de reflexão, desenvolvidas a partir de resultados de testes em modelo físico, são função de coeficientes empíricos a e b , como por exemplo,

$$C_r = \frac{aI_r^2}{b + I_r^2} \quad (3)$$

$$C_r = \frac{aI_r}{b + I_r} \quad (4)$$

Para taludes simples lisos, Seelig (1983) aproximou a equação (3) aos dados disponíveis, tendo obtido a igual a 1.0 e b igual a 5.5 ou 6.2. Allsop (1988) para ondas irregulares reflectidas por taludes lisos de 1:1.33, 1:1.5 e 1:2.0 e para condições de teste em que o número de Iribaren variava entre 3 e 6, usou a equação (3), tendo obtido a e b iguais a 1.08 e 5.7, respectivamente, conseguindo um bom ajuste aos dados disponíveis.

Allsop (1990) testou taludes lisos simples não galgáveis para valores do número de Iribaren entre 1.7 e 10.2. Aos dados obtidos ajustou curvas do tipo (3), tendo obtido a igual a 0.96 e b igual a 4.80. Taveira Pinto et al. (1998) usou modelos de quebramares submersos lisos com as características indicadas no quadro 3 para avaliar os coeficientes de reflexão.

Foram usadas ondas irregulares (espectro de Jonswap) e com I_r no intervalo de 1 a 12. Aos resultados foi ajustada uma curva do tipo (4) e para o caso de d/gT^2 igual a 0.0142,

correspondente ao período de pico de 1.2 s, foram obtidos os parâmetros a e b iguais a 1.83 e 14.3, respectivamente.

1.1.2. Transmissão

A energia de uma onda incidente transmitida através de uma estrutura depende das suas características – período e altura da onda, altura relativa da água (d/L) e declividade da onda (H_{si}/L) –, do tipo de estrutura – taludes rugosos ou lisos, permeáveis ou impermeáveis – e da sua geometria - talude, elevação da crista relativamente ao nível médio da água e largura da crista. A transmissão é quantificada através do coeficiente de transmissão, K_t , normalmente em função da altura de onda transmitida, H_{st} , isto é,

$$K_t = \frac{H_{st}}{H_{si}} \quad (5)$$

A transmissão total da energia da agitação através de um quebramar deve ser reduzida de forma a evitar estragos e/ou ressonâncias no interior de um porto, ou outros impactes na zona protegida pela estrutura. Em estruturas impermeáveis, a elevação e a largura da crista são parâmetros importantes a tomar em consideração.

Van Der Meer (1991) relacionou os coeficientes de transmissão de quebramares submersos impermeáveis com a altura da crista adimensional, R_c/H_{si} , sendo R_c a submergência da crista relativamente ao nível médio (negativa se inferior ao nível da crista), tendo obtido as seguintes expressões,

$$K_t = \begin{cases} 0.80 & , -2.00 < \frac{R_c}{H_{si}} \leq -1.13 \\ 0.46 - 0.30 \frac{R_c}{H_{si}} & , -1.13 < \frac{R_c}{H_{si}} \leq 1.20 \\ 0.10 & , 1.20 < \frac{R_c}{H_{si}} \leq 2.00 \end{cases} \quad (6)$$

Para estruturas impermeáveis ou com baixa permeabilidade, tais como quebramares de taludes com cristas pavimentadas, D' Angremond et al., (1996), obteve uma equação, que incluía a influência da largura da crista, B , do ângulo do talude e da altura da crista, com a seguinte forma,

$$K_t = a \frac{R_c}{H_{si}} + b \quad (7)$$

ou seja,

$$K_t = -0.40 \frac{R_c}{H_{si}} + \left(\frac{B}{H_{si}} \right)^{-0.31} \left(1 - e^{-0.5 l_r} \right) c \quad (8)$$

em que o parâmetro c assume diferentes valores, conforme a permeabilidade do quebramar – 0.64 para estruturas permeáveis e 0.80 para as impermeáveis.

Em muitos estudos, Taveira Pinto et al. (1998), o coeficiente de transmissão é descrito em função do designado coeficiente de transmissibilidade, R^* , dado pela expressão,

$$R^* = \frac{R_c}{H_{si}} \sqrt{\frac{H_{si}}{L_0 2 \pi}} = \frac{R_c}{H_{si}} \sqrt{\frac{H_{si}}{g T^2}} \quad (9)$$

Taveira Pinto et al. (1998) calculou, para R_c igual a zero, valores médios do coeficiente de transmissão. Para o período de pico de 0.9 s esses valores encontram-se no

Quadro 1.

Quadro 1 – Valores médios medidos do coeficiente de transmissão.

Inclinação do Talude	1:1	3:2	2:1
K_t	0.66	0.70	0.64

1.1.3. Dissipação

A previsão do coeficiente de dissipação, K_d , raramente é objecto de estudos e poucas referências podem ser encontradas acerca dele. A dissipação de energia da uma onda originada pela presença de uma estrutura, pode ser medida pelo coeficiente de dissipação, que, devido ao princípio da conservação de energia, está relacionado com os coeficientes de reflexão e transmissão, pela seguinte expressão,

$$C_r^2 + K_t^2 + K_d^2 = 1 \quad (10)$$

Taveira Pinto et al. (1998) calculou, para R_c igual a zero, valores médios do coeficiente de dissipação. Para o período de pico de 1.0 s. esses valores encontram-se no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores médios medidos do coeficiente de dissipação.

Inclinação do Talude	1:1	3:2	2:1
K_d	0.55	0.61	0.69

1.2. Teorias de onda

A agitação é um fenómeno complexo e difícil de descrever correctamente em termos matemáticos. No entanto, muitas das suas características podem ser descritas dentro de certos limites. As características das ondas geradas nestas experiências, nomeadamente a elevação da superfície livre e as velocidades horizontais e verticais do escoamento, podem ser comparadas com os valores calculados por diversas teorias de onda, tal como a teoria linear e a teoria de Stokes (de ordem 2 e 3).

1.2.1. Teoria Linear.

A equação para a elevação da superfície livre, η , é dada pela seguinte equação,

$$\eta = \frac{H_{sj}}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (11)$$

em que x representa a abcissa considerada, k o número de onda ($2\pi/L$) e σ a frequência da onda ($2\pi/T$). A descrição gráfica dos termos usados nas teorias de onda encontra-se representada na figura 1, de acordo com o sistema de eixos coordenados,

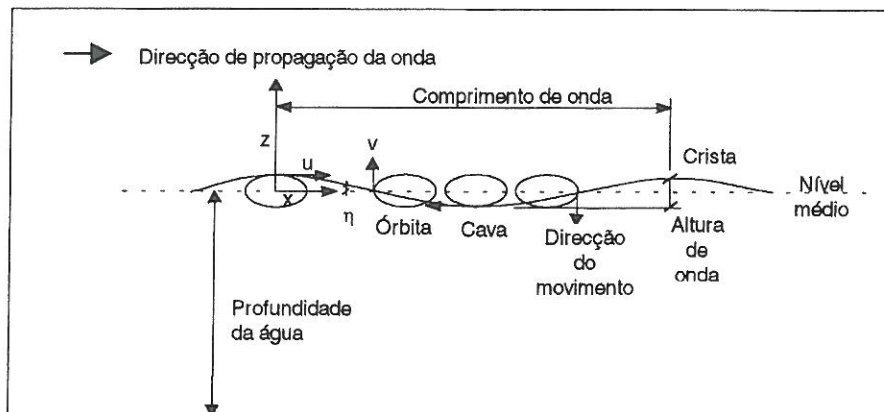


Figura 1 – Descrição gráfica das variáveis.

A celeridade ou velocidade a que se propaga a onda, C , é dada pela seguinte equação,

$$C = \frac{\sigma}{k} = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} = \left(\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \right)^{1/2} \quad (12)$$

A equação implícita que permite determinar o comprimento de onda, é função do período da onda, T e da profundidade da água, d , isto é,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (13)$$

A componente horizontal da velocidade de uma partícula a uma distância z do nível médio das águas (valores negativos) é igual a,

$$u = \frac{\pi H_{si}}{T} \frac{\cosh 2\pi(z+d)/L}{\sinh 2\pi d/L} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (14)$$

e a sua componente vertical é igual a,

$$v = \frac{gH_{si}T}{2L} \frac{\sinh 2\pi(z+d)/L}{\cosh 2\pi d/L} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (15)$$

A energia total por unidade de largura da crista é igual à soma da energia cinética e da energia potencial. A energia cinética de um elemento de fluído é igual a,

$$\frac{\gamma}{2g} (u^2 + v^2 + w^2) dx dy dz \quad (16)$$

em que γ representa o peso volúmico da água e u , v e w as componentes da velocidade.

Tomando em conta as características do escoamento, que pode considerar-se como um escoamento bidimensional, a energia cinética de um elemento de fluído pode ser expressa apenas em função dos valores u e v , isto é, em função das componentes horizontal e vertical da velocidade nesse ponto. Assim, a energia cinética total de uma onda por unidade de largura da crista, E_k , será igual a,

$$E_k = \frac{\gamma}{2g} \int_0^L \int_{-d}^{\eta} (u^2 + v^2) dz dx \quad (17)$$

que, utilizando as equações (14) e (15), origina,

$$E_k = \int_0^L \int_{-d}^{\eta} \frac{\gamma}{2g} \left[\left(\frac{gH_{si}k}{2\sigma} \frac{\cosh k(z+d)}{\cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \right)^2 + \left(\frac{gH_{si}k}{2\sigma} \frac{\sinh k(z+d)}{\cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \right)^2 \right] dz dx = \frac{\gamma H_{si}^2 L}{16} \quad (18)$$

A energia potencial de um elemento de fluído localizado à distância z do nível médio da água é igual a ($\gamma z dx dy dz$). A energia potencial total de uma onda por unidade de largura da crista, E_p , é dada por,

$$E_p = \int_0^L \int_0^{\eta} \gamma z dz dx \quad (19)$$

o que, utilizando a equação (11), resulta em,

$$E_p = \frac{1}{2} \int_0^L \gamma \eta^2 dx = \frac{\gamma H_{si}^2}{8} \int_0^L \cos^2 (kx - \sigma t) dx = \frac{\gamma H_{si}^2 L}{16}. \quad (20)$$

A energia total de uma onda por unidade de largura da crista é então dada por,

$$E = E_k + E_p = \frac{\gamma H_{si}^2 L}{8}. \quad (21)$$

Stokes indica que a teoria linear só é válida se o valor da declividade da onda for pequeno, o que significa, por consequência, que $L^2 H_{si} / 2d^3$, também designado por parâmetro de Ursell, tem que ser pequeno. O valor limite de $L^2 H_{si} / 2d^3$ não foi determinado experimentalmente, mas é normalmente aceite que,

$$\frac{L^2 H_{si}}{2d^3} \ll \frac{16\pi^2}{3} \quad (22)$$

condição que se verificou em todos os ensaios realizados.

1.2.2. Teoria de Stokes.

Para uma abordagem de segunda ordem, as equações que permitem determinar a celeridade e o comprimento de onda são as mesmas que para a teoria linear, ou seja, as equações (12) e (13).

A elevação da superfície livre é expressa por,

$$\eta = \frac{H_{si}}{2} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{\pi H_{si}^2}{4L} \left(1 + \frac{3}{2 \sinh^2 2\pi d/L} \right) \coth \frac{2\pi d}{L} \cdot \cos 4\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right). \quad (23)$$

As componentes das velocidades das partículas da água em qualquer ponto de coordenadas (x, z) do fluido são obtidas por,

$$u = \frac{\pi H_{si}}{T} \frac{\cosh 2\pi(z+d)/L}{\sinh 2\pi d/L} \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H_{si}}{T} \right) \left(\frac{\pi H_{si}}{L} \right) \frac{\cosh 4\pi(z+d)/L}{\sinh^4 2\pi d/L} \cos 4\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \quad (24)$$

e por,

$$v = \frac{\pi H_{si}}{T} \frac{\sinh 2\pi(z+d)/L}{\sinh 2\pi d/L} \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{3}{4} \left(\frac{\pi H_{si}}{T} \right) \left(\frac{\pi H_{si}}{L} \right) \frac{\sinh 4\pi(z+d)/L}{\sinh^4 2\pi d/L} \sin 4\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right). \quad (25)$$

Stokes apresenta ainda aproximações de ordem mais elevada. Para o caso da aproximação de terceira ordem, a superfície livre é dada por,

$$\eta = a \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{\pi a^2}{L} f_2 \left(\frac{d}{L} \right) \cos 4\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \frac{\pi^2 a^3}{L^2} f_3 \left(\frac{d}{L} \right) \cos 6\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right), \quad (26)$$

em que,

$$f_2 \left(\frac{d}{L} \right) = \frac{(2 + \cosh 4\pi d/L) \cosh 2\pi d/L}{2 \sinh^3 2\pi d/L} \quad (27)$$

e

$$f_3 \left(\frac{d}{L} \right) = \frac{3}{16} \cdot \frac{(1 + 8 \cosh^6 2\pi d/L)}{\sinh^6 2\pi d/L} \quad (28)$$

e a relação entre a altura de onda H_{si} e a amplitude a é dada por,

$$H_{si} = 2a + 2 \frac{\pi^2}{L^2} a^3 f_3 \left(\frac{d}{L} \right). \quad (29)$$

O comprimento de onda a ser usado nesta aproximação de terceira ordem é dado por,

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \left[1 + \left(\frac{2\pi d}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 4\pi d/L}{16 \sinh^4 2\pi d/L} \right]. \quad (30)$$

Verifica-se que o comprimento de onda depende, para além da altura de onda, também da profundidade da água e do período de onda. Isto torna a utilização das equações de terceira ordem difícil, pois as variáveis têm que ser calculadas implicitamente umas através das outras. A celeridade da onda é calculada através da seguinte equação,

$$C^2 = \frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \left[1 + \left(\frac{\pi a}{L} \right)^2 \frac{14 + 4 \cosh^2 4\pi d/L}{16 \sinh^4 2\pi d/L} \right]. \quad (31)$$

As componentes das velocidades das partículas em qualquer ponto de coordenadas (x, z) do fluido podem facilmente encontrar-se a partir do potencial de velocidades, obtendo-se, respectivamente,

$$\begin{aligned} \frac{u}{C} = & F_1 \cosh \frac{2\pi}{L} (z + d) \cos 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \\ & + F_2 \cosh \frac{4\pi}{L} (z + d) \cos 4\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + F_3 \cosh \frac{6\pi}{L} (z + d) \cos 6\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) \end{aligned} \quad (32)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{v}{C} = & F_1 \sinh \frac{2\pi}{L} (z + d) \sin 2\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + \\ & + F_2 \sinh \frac{4\pi}{L} (z + d) \sin 4\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right) + F_3 \sinh \frac{6\pi}{L} (z + d) \sin 6\pi \left(\frac{x}{L} - \frac{t}{T} \right), \end{aligned} \quad (33)$$

em que,

$$F_1 = \frac{2\pi a}{L} \frac{1}{\sinh 2\pi d/L} - \left(\frac{2\pi a}{L} \right)^2 \frac{(1 + 5 \cosh^2 2\pi d/L) \cosh^2 2\pi d/L}{8 \sinh^5 2\pi d/L}, \quad (34)$$

$$F_2 = \frac{3}{4} \left(\frac{2\pi a}{L} \right)^2 \frac{1}{\sinh^4 2\pi d/L} \quad (35)$$

$$F_3 = \frac{3}{64} \left(\frac{2\pi a}{L} \right)^3 \left\{ \frac{11 - 2 \cosh 4\pi d/L}{\sinh^7 2\pi d/L} \right\} \quad (36)$$

1.3. Análise da energia da onda

Os coeficientes de reflexão, transmissão e dissipação podem ser também determinados através das energias totais reflectidas e transmitidas, E_r e E_t , em função da energia total incidente, E_i , ou seja,

$$C_r = \sqrt{\frac{E_r}{E_i}} \quad (37)$$

e

$$K_t = \sqrt{\frac{E_t}{E_i}} \quad (38)$$

Da interferência da agitação incidente com o quebramar gera-se uma onda que é reflectida e de cuja sobreposição com a incidente, resulta uma onda parcial ou totalmente estacionária. A variação no tempo da superfície livre, bem como o campo de velocidades associado está esquematicamente representado na Figura 2 e 3, onde se verifica a formação dos designados nodos e ventres, falsos ou verdadeiros, onde ocorrem os valores extremos das velocidades e das acelerações.

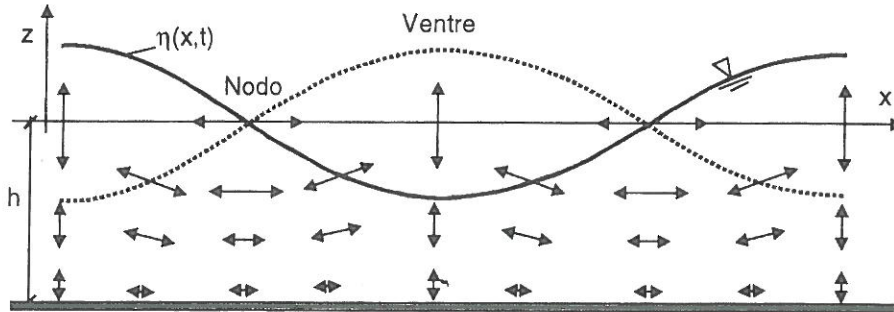


Figura 2 – Elevação da superfície livre da água e campo de velocidades numa onda totalmente estacionária.

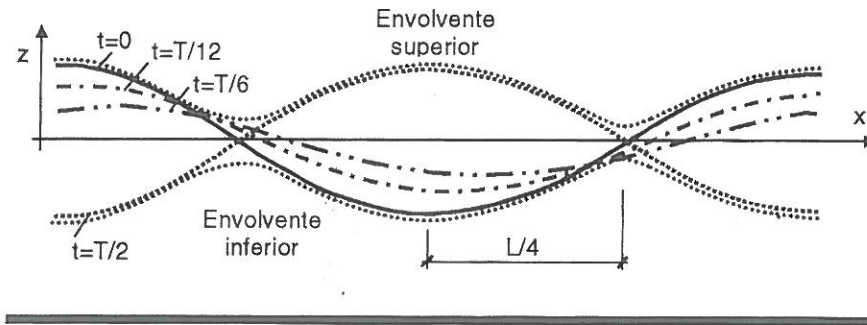


Figura 3 – Evolução da elevação da superfície livre da água e respectiva envolvente, numa onda parcialmente estacionária.

A avaliação da energia através da medição das velocidades requer por isso a escolha da secção em que estas medições serão efectuadas. De forma a efectuar essa escolha é importante analisar a definição de fluxo energético médio ao longo de um período, \bar{F} . Esta grandeza, que corresponde ao trabalho efectuado pela pressão dinâmica ao longo de um período, para a onda progressiva, é igual a,

$$\bar{F} = \frac{\gamma H_{si}^2}{8} \frac{L}{T} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \right\} = E C n \quad (39)$$

em que H_{si} representa a altura de onda incidente, T o período de onda, k o número de onda ($2\pi/L$), E a energia total por comprimento de onda, C a celeridade da onda e n uma constante.

Pode verificar-se que o fluxo energético é constante para uma onda progressiva e igual a uma parte da energia total da onda. No caso de uma onda parcialmente estacionária, tal como acontece na presença de um quebramar submerso, o fluxo energético médio será igual a,

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-d}^{\eta} \left(\frac{H_{si}}{2} g \frac{\cosh k(d+z)}{\cosh kd} \right) * \left(\frac{k}{\sigma} (\cos(kx - \sigma t) - C_r \cos(kx + \sigma t + \varepsilon)) \right) dz dt \quad (40)$$

em que ε representa o atraso de fase da onda reflectida. Assim, o fluxo energético médio depende da distância, x , da secção de medição ao quebramar.

Demonstra-se teoricamente que, para um determinado coeficiente de reflexão, que a energia reflectida é a que se obtém pela média da energia verificada nas secções de máxima e mínima energia potencial, o que corresponde, aproximadamente à energia verificada na secção intermédia às duas já referidas, ou seja a uma distância x igual a $(2N+1)*L/8$, sendo N um inteiro.

O cálculo da energia incidente total, E_i , através de medições sem os modelos e da energia total do escoamento, E , na presença dos modelos, permite determinar a energia reflectida, E_r , ou seja,

$$E_r = E - E_i \quad (41)$$

e assim é possível calcular o coeficiente de reflexão, através da equação (37).

2. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

As medições foram efectuadas no tanque de ondas unidireccional do Laboratório de Hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. O tanque de ondas que se encontra esquematicamente representado na Figura 4 tem 4.8 m de largura, 24.5 m de comprimento e profundidades máximas de 0.60 e 0.40 m, junto ao gerador de ondas e na secção de medição, respectivamente. As características dos modelos de quebramares estão descritos na Figura 4 e no Quadro 3. De forma a evitar alguns efeitos tridimensionais e de difracção, durante a realização dos ensaios com agitação regular, foi utilizada uma parede divisória de pequena espessura, que isola a secção de medição da restante parte do tanque. Para diminuir ao mínimo a reflexão das ondas no fundo do tanque, foi aí colocada uma praia de pequeno declive, ajudando assim a dissipar a energia das ondas.

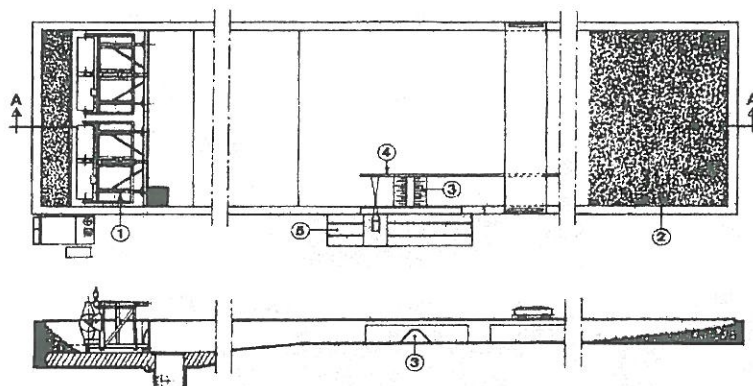


Figura 4 – Tanque de ondas do Laboratório de Hidráulica (1 – Batedor; 2 – Praia absorvente; 3 – Secção de teste; 4 – Pared divisória; 5 – Mesa de coordenadas.)

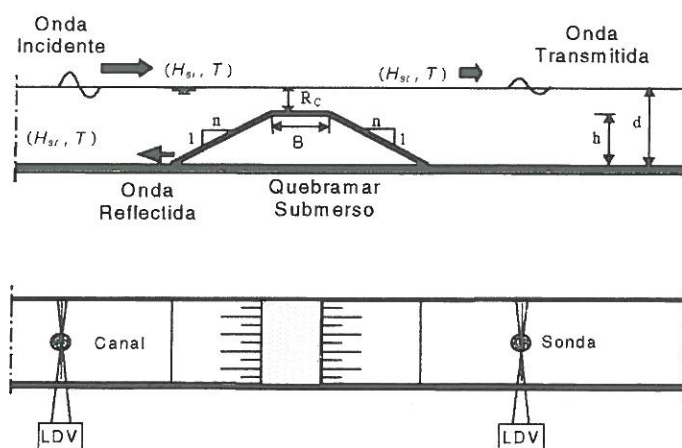


Figura 5 – Esquema de teste dos quebramares submersos.

Quadro 3 – Características dos modelos.

Modelo	h (m)	B (m)	n	d (m)
1 (1:1)	0.200	0.05	1.0	0.2
2 (3:2)	0.200	0.05	1.5	0.2
3 (2:1)	0.200	0.05	2.0	0.2

Para registar a elevação instantânea da superfície livre da água, foram utilizadas três sondas. Uma dessas sondas foi colocada na secção onde a medição de velocidades foi efectuada e as duas restantes colocadas a 0.4 m da primeira, respectivamente, antes e depois, na direcção de propagação das ondas.

Para a medição das velocidades foi utilizada um laser, operando no sistema “single mode” com uma potência de 1 W. O sistema óptico de anemometria Laser – Doppler é constituído por um módulo base ligado a um outro sistema de fibras ópticas associadas a uma sonda de 60 mm e a operar na configuração de backscatter. O posicionamento da sonda de fibras ópticas e por conseguinte do volume de controlo do ponto de medição desejado da secção de teste, foi efectuada através de uma mesa de coordenadas tridimensional localizada lateralmente à zona de medição do tanque de ondas.

Foi utilizada uma frequência de “shift” de 0,1 MHz nas células de “Bragg” e uma lente de distância focal de 600 mm, antes da qual foi colocado um expansor para melhorar o alinhamento dos raios e para reduzir o tamanho do volume de controlo. A luz reflectida foi recolhida por um fotomultiplicador e o sinal resultante foi processado por um contador, considerando apenas uma única medição por “burst” validado e com um critério de validação igual a 1% após filtragem.

O contador e a sonda de níveis hidrodinâmicos estavam interligados, de forma a que ambos os sinais (velocidade e nível da água) fossem simultaneamente adquiridos, quando o contador validava o valor da velocidade. O Quadro 4 apresenta uma lista das principais características do sistema de Anemometria Laser.

Quadro 4 – Características principais do sistema laser.

Comprimento de onda do laser.....	514.5 nm
Metade do ângulo formado pelos raios.....	3.487°
Dimensão do volume de controlo:	
Eixo maior.....	1.507 mm
Eixo maior	91.9 µm
Espaçamento das franjas.....	4.229 µm
Frequência de “shift”.....	0.1 MHz

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise das características das ondas obtidas através do sistema experimental disponível, foi efectuada para três diferentes profundidades e alturas de onda esperadas, conforme Quadro 5 e Quadro 6.

Quadro 5 – Características da onda incidente, medidas (m) e calculadas (t).

d(m)	\bar{H}_m (m)	\bar{T}_m (m)	\bar{L}_m (m)	\bar{L}_t (m)	\bar{C}_m (m/s)	\bar{C}_t (m/s)
0.18	0.031	0.9	1.06	1.02	1.17	1.13
0.20	0.033	0.9	1.03	1.05	1.15	1.17
0.22	0.028	0.9	1.05	1.08	1.16	1.20

Quadro 6 – Características da onda incidente, medidas (m) e calculadas (t).

d(m)	\bar{H}_m (m)	\bar{T}_m (m)	\bar{L}_m (m)	\bar{L}_t (m)	\bar{C}_m (m/s)	\bar{C}_t (m/s)
0.18	0.036	1.2	1.47	1.46	1.23	1.22
0.20	0.034	1.2	1.52	1.52	1.27	1.27
0.22	0.037	1.2	1.55	1.58	1.30	1.32

As medições da elevação da superfície livre para profundidades de 0.22, 0.20 e 0.18 m, respectivamente, são apresentadas na Figura 6 e comparadas com as elevações da superfície livre teóricas, de acordo com a teoria linear, Stokes de segunda ordem e Stokes de terceira ordem. Os resultados são similares e a melhor aproximação corresponde à de Stokes de segunda ordem. Foram também determinados os campos de velocidades associados a esses níveis.

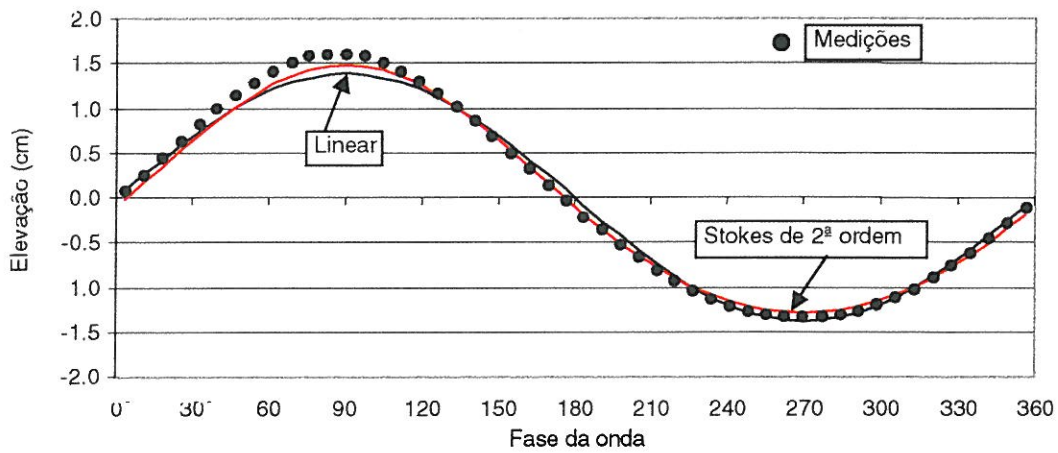


Figura 6 – Exemplo comparativo dos valores médios da elevação da superfície livre medida e calculada ($d=0.22$ m, $T=0.9$ s, $H=0.027$ m, $L=1.03$ m, $C=1.15$ m/s).

A Figura 7 mostra valores para uma profundidade de água de 0.20 m e os resultados teóricos calculados através das equações (24) e (25). Os valores da velocidade horizontal e vertical estão também apresentados na figura 5 juntamente com os valores teóricos calculados. As diferenças verificadas resultam do facto de as características das ondas geradas não coincidirem exactamente com as teóricas e de os valores correspondentes aos máximos da superfície livre não poderem ser registados. Devido às características inerentes ao sistema de medição por Anemometria Laser, não é possível determinar os valores de velocidades na superfície livre e junto ao fundo do tanque.

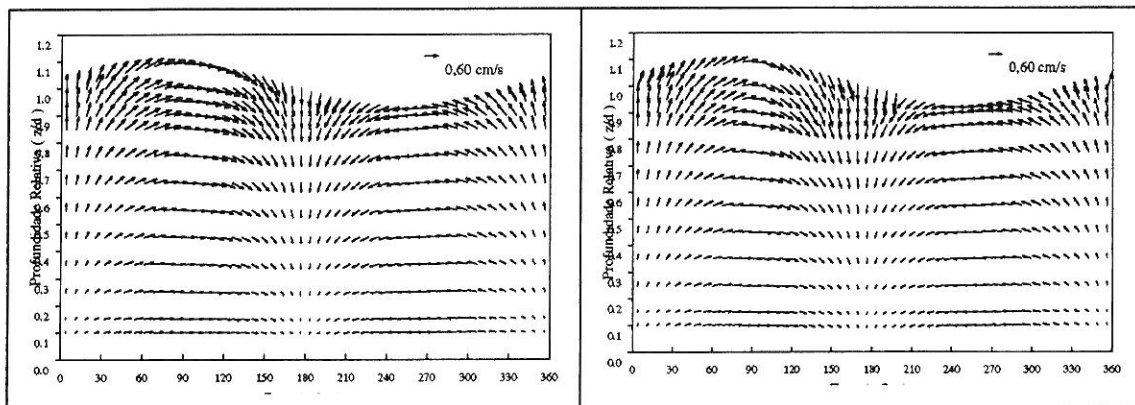


Figura 7 – Campo de velocidades totais calculado e medido ($d=0.20$ m, $T=0.9$ s, $H=0.033$ m).

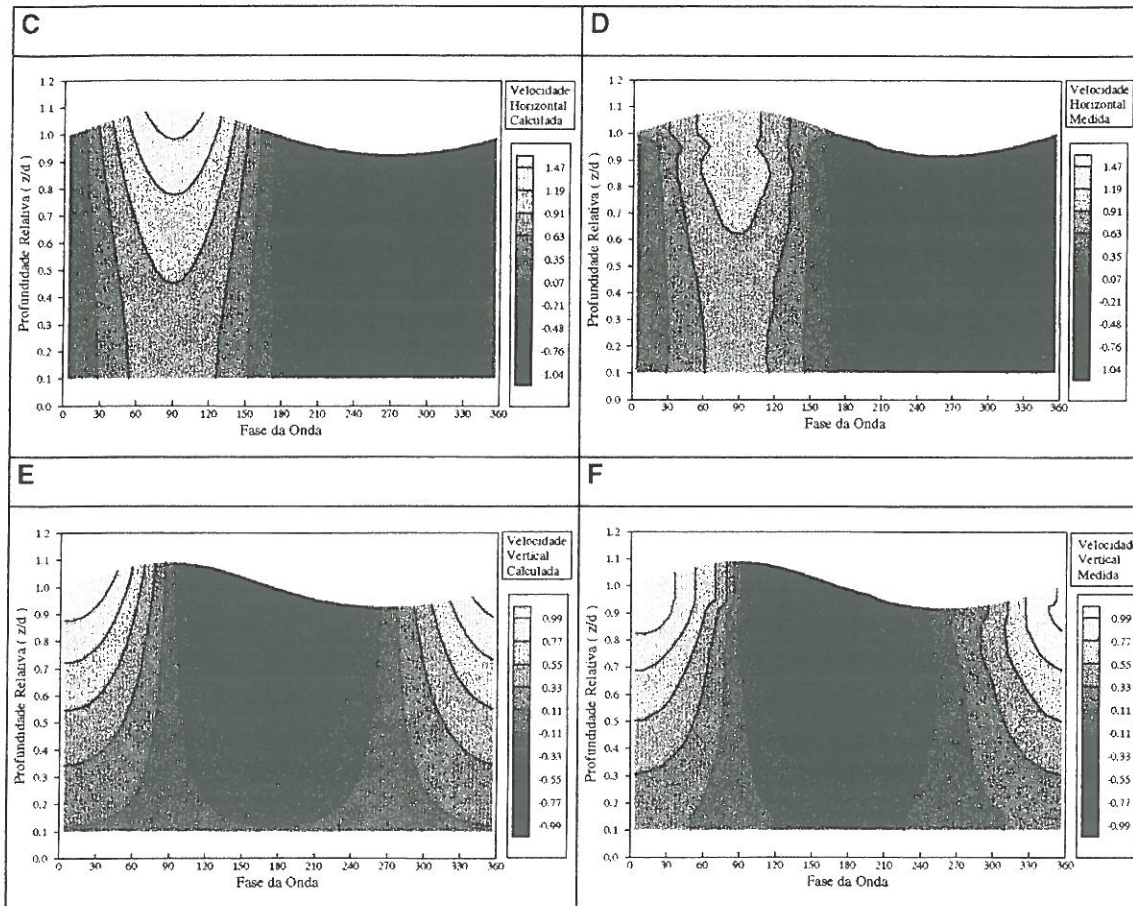


Figura 8 – Componentes horizontais e verticais calculadas pela teoria de Stokes de 2ª ordem (A e C) e medidas (B e D) – $d=0.20$ m, $T=0.9$ s, $H=0.033$ m.

Utilizando os valores obtidos para a profundidade de 0.20 m foram calculadas através das equações (17) e (19) as energias cinética, potencial e total. No quadro 6 são apresentados esses valores juntamente com os valores teóricos correspondentes. A energia potencial foi calculada utilizando valores médios da elevação da superfície livre medidos durante os testes. Os resultados obtidos são similares aos valores teóricos.

Foram efectuadas medições de velocidades para uma profundidade de água de 0.20 m, na presença dos modelos de quebramares 1, 2 e 3, à frente e atrás da estrutura a uma determinada distância deste, como se mostra na figura 3. Os campos de velocidades determinados encontram-se na figura 6. A influência dos modelos é facilmente verificada através dos campos de velocidades apresentados.

Quadro 7 – Energia cinética e potencial da onda, medida e teórica, na ausência dos modelos. ($T=0.9$ s, $H=0.030, 0.033, 0.027$ m)

d (m)	$E_{k,t}$ (N*m)			$E_{p,t}$ (N*m)			$E_{l,t}$ (N*m)			$E_{k,m}$	$E_{p,m}$	$E_{t,m}$
	Lin.	St2	St3	Lin.	St2	St3	Lin.	St2	St3			
0.18	0.55	0.56	0.44	0.61	0.61	0.61	1.15	1.17	1.05	0.70	0.51	1.20
0.20	0.69	0.70	0.49	0.69	0.70	0.70	1.38	1.40	1.19	0.61	0.73	1.35
0.22	0.50	0.51	0.37	0.49	0.50	0.50	1.00	1.00	0.87	0.47	0.47	0.94

Quadro 8 – Energia cinética e potencial da onda, medida e calculada, na ausência dos modelos ($T=1.2$ s, $H=0.037$, 0.034 , 0.036 m).

d (m)	$E_{k,t}$ (N*m)			$E_{p,t}$ (N*m)			$E_{t,t}$ (N*m)			$E_{k,m}$	$E_{p,m}$	$E_{t,m}$
	Lin.	St2	St3	Lin.	St2	St3	Lin.	St2	St3			
0.18	1.06	1.12	0.55	1.14	1.18	1.18	2.20	2.30	1.73	1.31	1.11	2.42
0.20	1.03	1.08	0.62	1.09	1.11	1.11	2.12	2.19	1.73	0.98	1.09	2.07
0.22	1.26	1.30	0.77	1.27	1.29	1.29	2.53	2.59	2.06	1.74	1.29	3.03

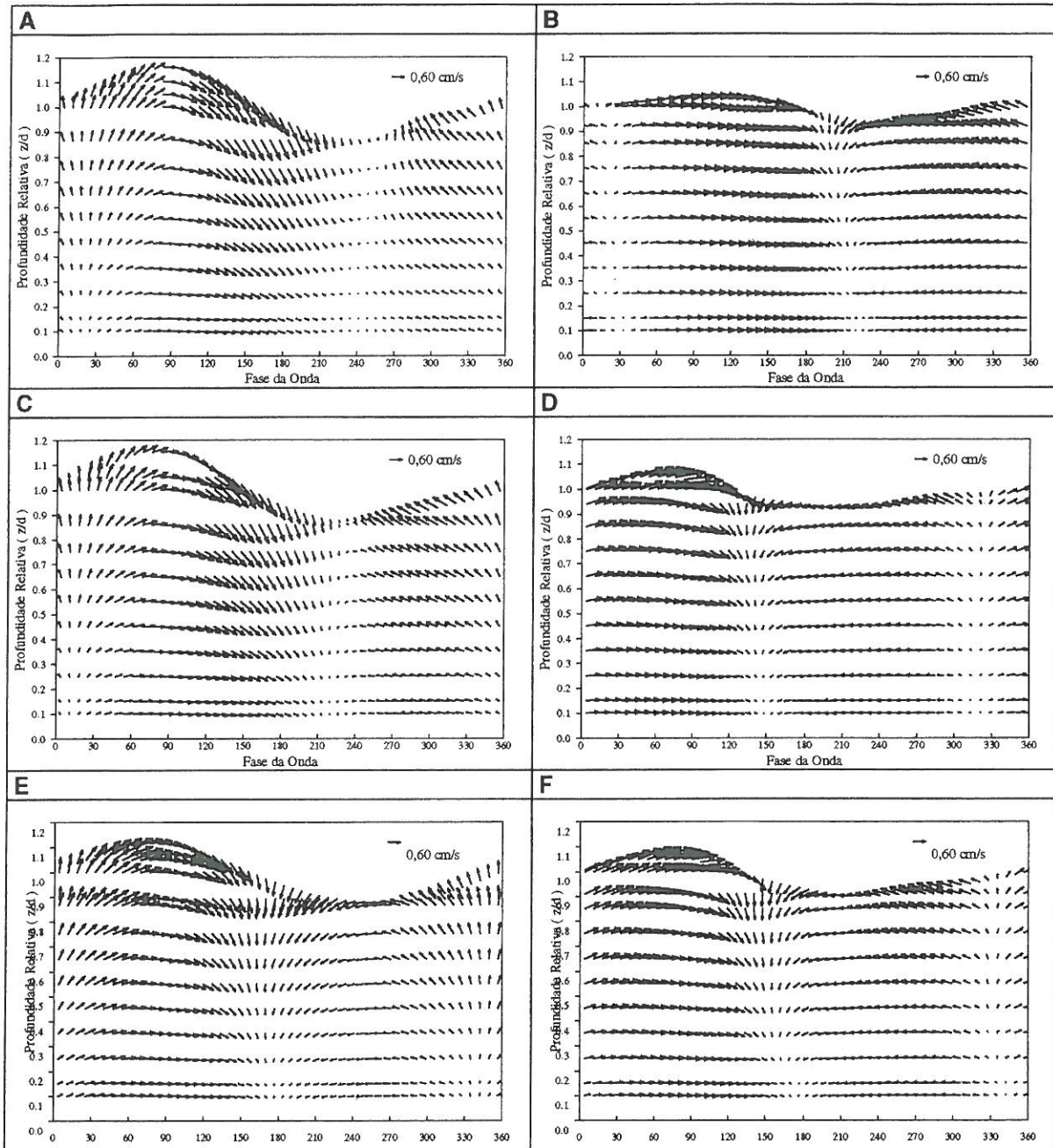


Figura 9 – Campos de velocidades medidos, associados ao fenómeno da reflexão. (A/B-modelo 1, C/D-modelo 2 and E/F-modelo 3) (A/C/E-secção de máxima energia, B/D/F-secção de mínima energia) ($d=0.20$ m, $H=0.034$ m, $T=1.2$ s).

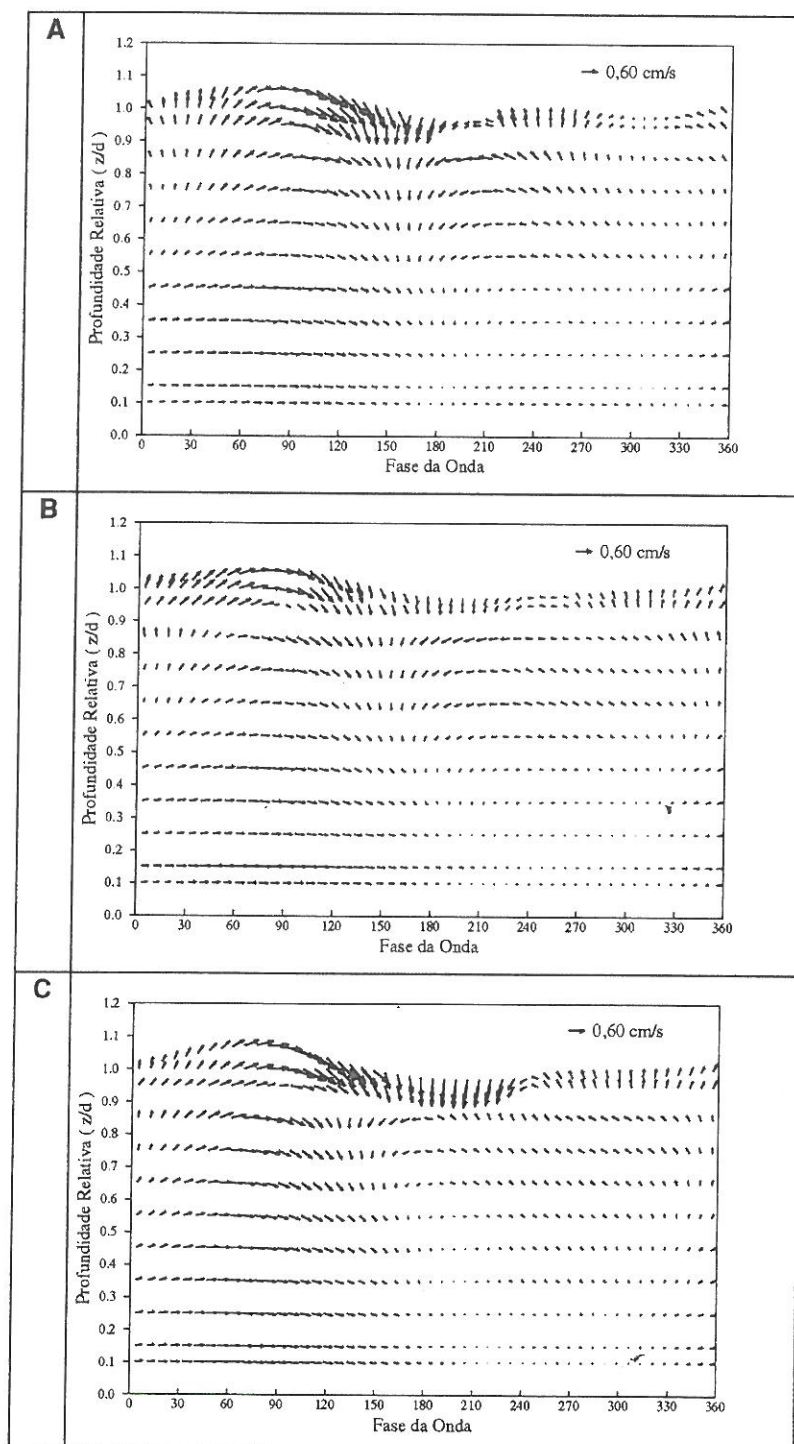


Figura 10 – Campo de velocidades medido, associado à transmissão (A – modelo 1, B – modelo 2 e C – modelo 3, $d=0.20$ m, $T=0.9$ s, $H=0.033$ m).

Cálculos similares para as energias cinética e potencial foram também efectuados para os modelos 1, 2 e 3. Os resultados obtidos para as energias cinética, potencial e total são apresentados no Quadro 9 e Quadro 10. Os valores da energia total obtidos através dos dados recolhidos à frente e atrás da estrutura permitem calcular os valores das energias reflectidas e transmitidas, respectivamente, os quais permitirão avaliar os coeficientes de reflexão, transmissão e dissipação através das equações (9) e (10).

Quadro 9 – Energia cinética e potencial associadas à reflexão.
Coeficientes de reflexão obtidos.

Modelo	Máximo (N*m)			Mínimo (N*m)			Total		C _r
	E _{k,m}	E _{p,m}	E _{t,m}	E _{k,m}	E _{p,m}	E _{t,m}	E _{t,m}	E _{r,m}	
--	--	--	--	--	--	--	1.97	--	--
1 (1:1)	1.04	2.87	3.91	3.01	0.51	3.52	3.72	1.75	0.94
2 (3:2)	1.51	2.53	4.04	2.23	0.80	3.03	3.54	1.57	0.89
3 (2:1)	1.31	2.05	3.36	1.92	1.15	3.07	3.22	1.25	0.80

Quadro 10 – Energia cinética e potencial associadas à transmissão.
Coeficientes de transmissão e dissipação obtidos.

Modelo	Transmissão (N*m)			K _t	K _d
	E _{k,m}	E _{p,m}	E _{t,m}		
--	--	--	1.35	--	--
1	0.25	0.23	0.48	0.59	0.42
2	0.19	0.20	0.39	0.54	0.72
3	0.22	0.22	0.44	0.57	0.73

Como não existem valores disponíveis de coeficientes resultantes de medições efectuadas em condições de teste semelhantes, foi feita a comparação com referências respeitantes a testes efectuados com taludes lisos simples ou quebramares submersos lisos ou rugosos com ondas irregulares. Os coeficientes de reflexão medidos são menores que os primeiros e maiores que os segundos o que era esperado quando analisado o ponto de vista do comportamento físico da estrutura bem como a agitação incidente, Quadro 11.

Quadro 11 – Comparação entre os coeficientes de reflexão medidos e calculados.

Modelo	I _r	C _{r,m}	Ref. (1)		Ref. (2)		Ref. (3)
			$\hat{C}_{r,1}$	$\hat{C}_{r,2}$	$\hat{C}_{r,3}$	$\hat{C}_{r,4}$	$\hat{C}_{r,5}$
1	8.11	0.94	0.92	0.91	0.99	0.89	0.66
2	5.40	0.89	0.84	0.82	0.90	0.82	0.50
3	4.05	0.80	0.75	0.73	0.80	0.74	0.40

(1) Seelig (1983) – Taludes simples lisos;
(2) Allsop (1988, 1990) – Taludes simples lisos – agitação irregular;
(3) Taveira Pinto *et al.* (1998) – Quebramares submersos lisos – agitação irregular.

Quadro 12 – Coeficientes de transmissão e dissipação medidos e calculados.

Modelo	$\frac{R_c}{H_{si}}$	$\frac{B}{H_{si}}$	K _{t,m}	Ref. (4)	Ref. (5)	Ref. (3)	K _{d,m}	Ref. (3)
				$\hat{K}_{t,1}$	$\hat{K}_{t,2}$	$\hat{K}_{t,3}$		$\hat{K}_{d,1}$
1 (1:1)	0.0	1.515	0.59	0.46	0.67	0.66	0.42	0.55
2 (3:2)	0.0	1.515	0.54	0.46	0.61	0.70	0.72	0.61
3 (2:1)	0.0	1.515	0.57	0.43	0.52	0.64	0.73	0.69

(3) Taveira Pinto *et al.* (1998) – Quebramares submersos lisos – agitação irregular;
(4) Van der Meer (1991) – Quebramares submersos impermeáveis e rugosos;
(5) D'Angremond *et al.* (1996) – Quebramares submersos impermeáveis e de crista lisa.

Os coeficientes de transmissão medidos só podem ser comparados com os da segunda espécie de referências. Como os dados disponíveis só existem para quebramares rugosos

impermeáveis, era esperado que os resultados medidos se encontrem entre ambos, Quadro 12.

Os coeficientes de dissipação resultam dos coeficientes acima mencionados, de acordo com a equação (10).

4. UMA POSSÍVEL APLICAÇÃO

Pelo que foi exposto inicialmente, relativo às características de funcionamento dos quebramares submersos, pode supor-se que eles serão particularmente eficazes em zonas onde as amplitudes de maré não são muito elevadas e/ou onde a agitação incidente poderá ser ou estar de alguma forma atenuada. Estas condicionantes relacionam-se com dois aspectos muito importantes. O primeiro resulta do facto de que para níveis de maré elevados, algumas ondas, em particular as de baixa amplitude, não serem atenuadas pelo quebramar. O segundo está interligado com a necessidade de que o quebramar tenha sempre alguma eficiência, ou seja, que atenue eficazmente a agitação incidente e proteja a linha de costa em causa, o que poderá não acontecer se a agitação for significativa e em particular para os níveis de maré superiores.

Para o caso da costa portuguesa as alturas de onda com maior probabilidade de ocorrência são da ordem dos 2.5 a 3.5 m, valores para os quais um quebramar submerso com cota de coroamento superior ao Zero Hidrográfico, poderá ter durante uma grande parte do dia e do ano, uma eficiência favorável em termos de defesa costeira.

Não há em Portugal uma grande experiência de aplicação de quebramares submersos. São conhecidos casos de aplicação para outros fins que não os da protecção costeira, o caso do quebramar submerso que protege a cabeça do quebramar norte do Porto de Leixões, um quebramar ligeiramente destacado junto à praia das Caxinas-Vila do Conde e um quebramar destacado em construção na zona da Foz do Neiva.

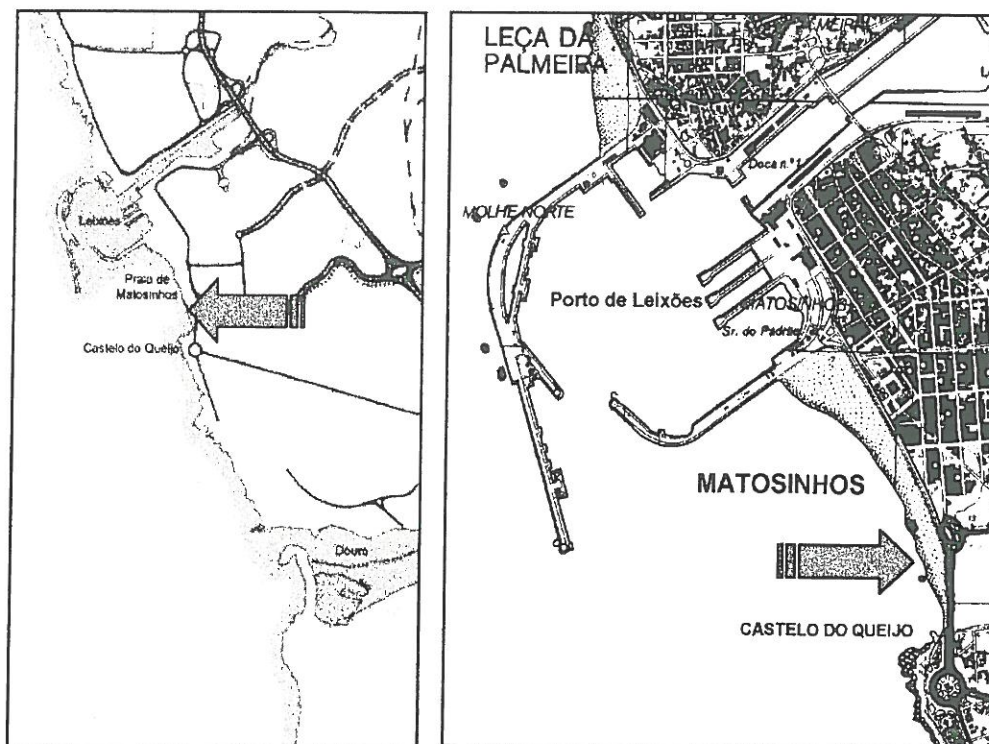


Figura 11 –Enquadramento da área em estudo.

Uma possível aplicação poderá ser estudada para a praia Internacional, em Matosinhos, localizada entre o quebramar sul do Porto de Leixões e o promontório do Castelo do Queijo, cerca de 2 km a Norte da Foz do Rio Douro, Figura 11.

Esta localização confere-lhe um carácter de baía encaixada e localizada na zona de sombra ou de difracção do quebramar referido, ou seja, uma zona potencialmente protegida. Contudo esta zona encontra-se particularmente exposta à agitação com orientação do quadrante de SW, o que tem provocado a erosão da praia junto ao Castelo do Queijo, bem como o desaparecimento das areias lá depositadas provenientes de dragagens efectuadas pelo Porto de Leixões (mais de 2 milhões de metros cúbicos, nos últimos anos).

Este fenómeno poderá estar relacionado com as correntes de difracção e de refracção que actuam neste troço de sul para norte, à interrupção do transporte longitudinal de sedimentos pelo próprio porto, bem como devido à concentração de energia que se verifica em alguns estudos de agitação

Na Figura 12 e na Figura 13 são apresentadas algumas das soluções possíveis, sem impacto paisagístico, que têm como funções principais a atenuação da agitação incidente e da agitação difractada, servir de estrutura de retenção a areias colocadas na praia ou depositadas pelas correntes provocadas.

Os quebramares poderiam ser submersos, com cotas de crista iguais ou inferiores a +1.00 ZH, exceptuando o enraizamento daqueles que estão ligados ao Castelo do Queijo, que por motivos construtivos possuem cotas mais elevadas nessa zona. Seriam associados a uma estrutura de retenção do tipo esporão, preconizada em estudos anteriores e por alimentação artificial com areias.

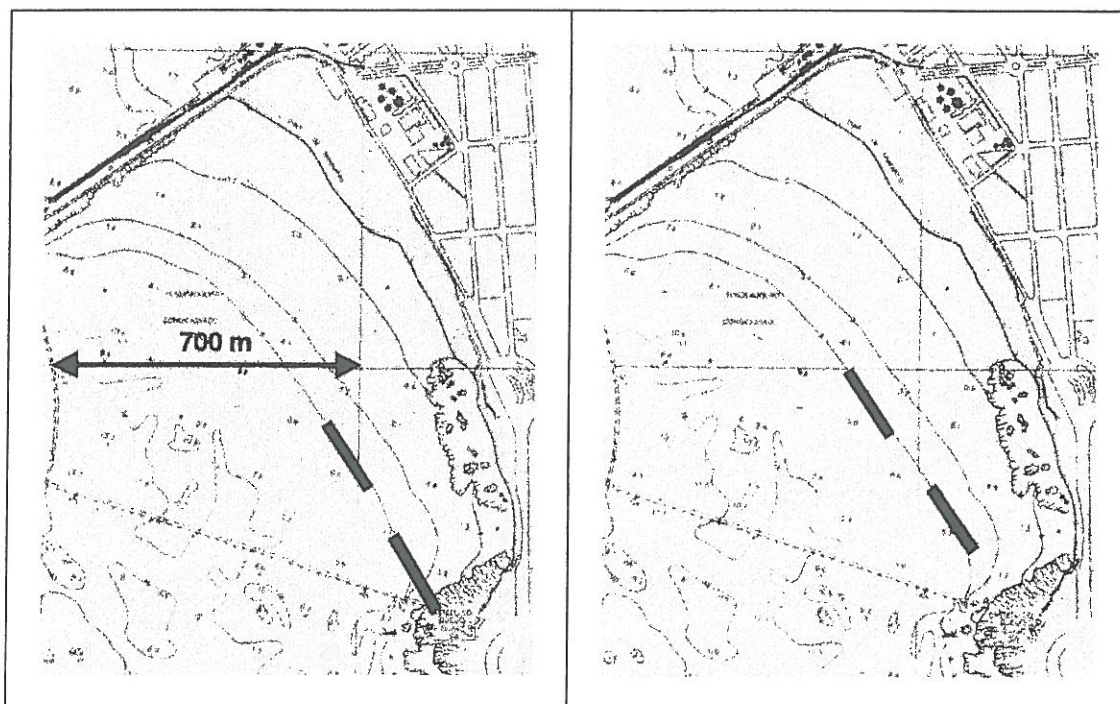


Figura 12 – Soluções possíveis para a praia Internacional, em combinação com alimentação artificial de areias e um esporão de retenção.



Figura 13 – Soluções possíveis para a praia Internacional, em combinação com alimentação artificial de areias e um esporão de retenção.

5. CONCLUSÕES

Foram efectuadas medições de velocidades em escoamentos oscilatórios de forma a ser desenvolvida uma metodologia de avaliação da energia reflectida e transmitida por quebra-mares submersos, através de coeficientes, cujo cálculo se baseia no conceito de energia total da onda.

Os escoamentos oscilatórios gerados foram analisados e as suas características comparadas com as obtidas teoricamente através das teorias de onda, nomeadamente a teoria linear e a teoria de Stokes de segunda e terceira ordens, tendo obtido-se aproximações bastante satisfatórias.

A avaliação da energia do escoamento foi efectuada de forma a avaliar a interferência do escoamento com os quebra-mares submersos através dos correspondentes coeficientes, tendo os resultados sido comparados com algumas referências existentes. A metodologia proposta parece ser adequada à análise da dissipação da energia em quebra-mares submersos, face aos bons resultados obtidos.

Face também aos resultados globais obtidos algumas conclusões podem ser apresentadas

O coeficiente de transmissão, para a mesma profundidade, não depende do modelo, visto que o principal factor que condiciona o fenómeno é a altura de água livre acima da crista do quebramar. Para um mesmo modelo, o coeficiente de transmissão diminui com o aumento do coeficiente de transmissibilidade. Estes dois aspectos estão fisicamente correctos. A transmissão no modelo rugoso é menor do que a dos modelos lisos, visto que a dissipação na crista é maior. Estas tendências verificam-se nos diferentes tipos de ensaios sendo os valores dos coeficientes de transmissão superiores no caso de períodos mais elevados.

Fisicamente o coeficiente de transmissão tende para 1,0 quando o coeficiente de transmissibilidade tende para $-\infty$ e tende para 0,0 quando o coeficiente de transmissibilidade tende para $+\infty$. Essa tendência é verificada nos resultados dependendo apenas do tipo de ensaio. Possui uma variação mais adrupta para valores elevados da altura de onda, para valores do coeficiente de transmissibilidade perto de zero.

Para uma mesma profundidade o coeficiente de reflexão diminui, em geral, com a diminuição da inclinação do talude. O coeficiente de reflexão, para a mesma profundidade,

depende do modelo, visto que o principal factor que condiciona o fenómeno é a inclinação do talude e a rugosidade. Para um mesmo modelo, o coeficiente de reflexão aumenta com o aumento do coeficiente de Iribarren. Estes dois aspectos estão também fisicamente correctos.

Os coeficientes de reflexão do modelo rugoso são também em geral menores do que todos os outros modelos. Esta tendência verifica-se nos diferentes tipos de ensaios sendo os valores dos coeficientes de reflexão superiores no caso de períodos mais elevados.

Fisicamente o coeficiente de reflexão tende para 1,0 quando o coeficiente de Iribarren tende para $+\infty$ e tende para 0,0 quando o coeficiente de Iribarren tende para 0,0. Esta tendência é verificada nos resultados, dependendo apenas da profundidade. Possui uma variação mais rápida para menores profundidades, a que correspondem menores valores do parâmetro d/gT^2 .

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Sr. Jerónimo de Sousa pela sua participação na construção dos modelos e na manutenção do sistema e à bolsreira Luciana Neves nos ensaios efectuadas.

REFERÊNCIAS

Allsop, N.W.H.; Hettiarachchi, S.S.L. (1988). "Reflections from coastal structures." Proc. 21th Int. Conf. Coastal Engng, ASCE, Malaga, 782–794.

Allsop, N.W.H. (1990). "Reflection performance of rock armored slopes in random waves." Proc. 22th Int. Conf. Coastal Engng, ASCE, 1470–1471.

D'Angremond, K., Van der Meer, J.W. and De Jong, R.J. (1996). "Wave transmission at submerged structures." Proc. 25th Int. Conf. Coastal Engineering, ASCE, Orlando, Florida, USA, 2418–2427.

Dean, Robert G. & Dalrymple, Robert A. 1994. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, Advanced Series on Ocean Engineering, Volume 2, USA.

Seelig, W. N. (1983). "Wave reflection from coastal structures." Proc. Coastal Structures'83 Conference, ASCE, Arlington.

Taveira-Pinto, F; Veloso-Gomes, F; Avilez-Valente, P. (1997). "Energy dissipation of low-crested breakwaters." Proc. Waves 97, The Third Int. Conf. on Ocean Wave Measurements and Analysis, ASCE, Virginia, USA, 600-614.

Taveira-Pinto, F., Proença, Maria Fernanda & Veloso-Gomes, F. (1998). "Energy dissipation study of submerged breakwaters using velocity measurements." Proc. of Ninth International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, Lisbon, Portugal.

Taveira-Pinto, F., Proença, Maria Fernanda & Veloso-Gomes, F. (1999). "Experimental analysis of reflected energy from submerged breakwaters." Proc. of 99 – Coastal Structures, ASCE (in print), Santander, Espanha.

Taveira-Pinto, F., Proença, Maria Fernanda & Veloso-Gomes, F. (1999). "Dissipation analysis on submerged breakwaters using laser Doppler velocimetry, for regular and random waves." Proc. of 8th International Conference Laser Anemometry Advanced and Applications, Roma, Italia, 253-265

Tropea, C.; Stieglmeier, M.; Dursthoff, W.; Zhan, L. (1989). "The application of LDA to the measurement of wave-induced velocity fields." IAHR Workshop on Instrumentation for Hydraulics Laboratories, Burlington, Ontario, Canada.

Van der Meer, J.W, (1991). "Stability and transmission at submerged structures." Publication No 453, Delft Hydraulics, Delft, The Netherlands.

Wiegel, Robert L. (1964), Oceanographical Engineering, USA.