

ENSAIOS BIDIMENSIONAIS DA REBENTAÇÃO SOBRE UM RECIFE ARTIFICIAL

Ana Mendonça, LNEC-NPE, amendonca@lnec.pt

Maria Borrego, LNEC-NPE, mborrego@lnec.pt

Mechteld ten Voorde, LNEC-NPE, mvoorde@lnec.pt

Maria da Graça Neves, LNEC-NPE, gneves@lnec.pt

José Simão Antunes do Carmo, IMAR/UC, jsacarmo@dec.uc.pt

RESUMO

Os recifes artificiais para surf são estruturas submersas que têm como objectivo melhorar as condições de surf, promovendo um determinado tipo de rebentação, podendo ainda, em alguns casos, servir como estruturas de protecção costeira e proporcionando um habitat protegido para espécies marinhas.

No presente trabalho apresenta-se o estudo em modelo físico, realizado no LNEC, da propagação de ondas sobre uma secção transversal de um recife artificial. Foram consideradas três geometrias para o recife (estrutura impermeável com geometria alta e baixa e estrutura de material geotêxtil com geometria baixa) e diferentes condições de agitação, de modo a avaliar a sua influência nas condições de rebentação geradas sobre o recife. Foram obtidos registos da variação da superfície livre ao longo do canal, assim como vídeos e fotografias, para verificação das características da rebentação. Observa-se que o tipo de rebentação nas três estruturas é semelhante, variando, no entanto, a posição da rebentação.

1. INTRODUÇÃO

A costa atlântica Portuguesa encontra-se bastante fragilizada e a necessitar de urgentes medidas reparadoras que satisfaçam simultaneamente os requisitos essenciais de protecção, salvaguardem a atracção turística e promovam o desenvolvimento sustentável.

Terão sido fundamentalmente os grandes volumes de areias extraídos dos sistemas fluviais e das zonas portuárias, nas últimas décadas, que conduziram ao défice sedimentar generalizado que hoje se manifesta ao longo de grande parte da costa Portuguesa. Terão igualmente contribuído para este balanço negativo muitas das obras de regularização fluvial, de que se destacam as grandes barragens construídas essencialmente a partir de meadas do século passado, bem como a implementação de estruturas portuárias e de outras obras com finalidades de protecção local.

Os recifes artificiais (Figura 1) apresentam-se como soluções inovadoras viáveis e suficientemente atractivas como estruturas complementares de protecção costeira. São, no entanto, soluções pouco testadas e para as quais a correcta caracterização da agitação marítima na zona onde estão implementadas é essencial em estudos de protecção costeira. Estes recifes artificiais funcionam como quebramares submersos, reduzindo a energia das ondas que chega à zona litoral na área de influência do recife, podendo, em alguns casos, atenuar os problemas de erosão ou mesmo favorecer a deposição de sedimentos a sotamar da estrutura.

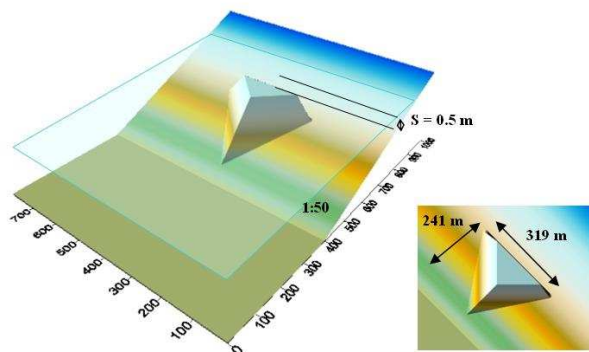


Figura 1. Geometria de um recife artificial.

Estas estruturas, para além de poderem funcionar como elemento de protecção costeira, proporcionam condições especiais de habitat para a vida marinha e a possibilidade de melhoria das condições de surf locais. A melhoria das condições de surf é conseguida promovendo-se um determinado tipo de rebentação, na sequência de aumentos controlados da altura de onda e do comprimento da linha de rebentação.

É neste contexto que surgem os recifes artificiais multifuncionais, estruturas que cumprem simultaneamente a função de protecção da costa e de melhoria das condições de surf nas proximidades da sua zona de implantação, justificando-se claramente como medida complementar de protecções naturais, nomeadamente dos vários sistemas dunares existentes e com elevadas fragilidades ao longa da costa portuguesa, e em alguns casos como alternativas viáveis a obras pesadas de engenharia. Estas construções têm vindo a ganhar cada vez mais adeptos, existindo hoje em dia alguns exemplos. O recife de Narrowneck, na Austrália, é um exemplo de sucesso (Jackson *et al.*, 2005).

No presente estudo procura-se estabelecer uma relação entre a estrutura do recife (material de construção, declive e dimensões) e as características de rebentação da onda, analisando-se em particular a influência da geometria do recife no tipo de rebentação, parâmetro muito relevante para o surf.

Uma vez seleccionada a geometria do recife (Figura 1), baseada nos resultados descritos em ten Voorde *et al.* (2009), foram realizados ensaios em modelo físico para diferentes condições de agitação marítima incidente e para dois tipos de recife: um impermeável, com fundo rígido, e outro composto por sacos de material geotêxtil preenchidos com areia. Para cada um deles foram estudadas duas geometrias de recife, que diferem entre si pelo nível do pé da estrutura, mantendo-se o declive do talude de montante e a cota de coroamento constantes. Neste artigo são descritos os ensaios realizados até ao momento, que correspondem às duas geometrias de recife impermeável e a uma das geometrias para o recife composto por sacos de material geotêxtil. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos.

Assim, após a introdução (ponto 1), segue-se no ponto 2 uma caracterização geral dos recifes artificiais. No ponto 3 descreve-se o modelo físico, identificando-se as características das geometrias testadas, os instrumentos de medição e as condições e procedimentos dos ensaios realizados. No ponto 4 apresentam-se os resultados obtidos para as soluções de recife ensaiadas. No último ponto tecem-se os comentários finais e as recomendações para futuros estudos.

2. CARACTERÍSTICAS DA REBENTAÇÃO NOS RECIFES ARTIFICIAIS PARA SURF

Uma das principais funções de um recife artificial para surf é melhorar as condições de surf na zona. De uma forma geral, pretende-se que esta estrutura induza ou melhore o tipo de rebentação e favoreça o aumento da altura da onda, provocando a rebentação num dado local e garantindo que esta ocorra de forma gradual ao longo da crista da onda e numa distância suficientemente longa.

Tal é conseguido através da definição da geometria, das dimensões e da localização do recife artificial que conduzem às melhores condições de surf para determinadas condições de agitação incidente. A comparação das diferentes opções de geometria, dimensões e localização de um recife artificial para surf recorre a parâmetros que permitem avaliar objectivamente e quantitativamente o desempenho do recife artificial.

Os parâmetros mais utilizados para análise do funcionamento de um recife artificial são: a altura de onda ao longo da linha de rebentação, o ângulo de rebentação ao longo da linha de rebentação, o comprimento da linha de rebentação, o tipo de rebentação, determinado através do Número de Iribarren, as características de “parede” da onda e a amplificação da onda em relação à altura de onda incidente.

A forma como se dá a rebentação é um parâmetro de grande importância para a prática do surf. Dependendo do nível de cada surfista, a rebentação deverá ser do tipo progressivo para iniciados, ou mergulhante para praticantes mais avançados, tornando-se impossível a prática da modalidade para a rebentação de fundo.

No dimensionado do recife artificial, o tipo de rebentação é controlado pela profundidade sobre o recife e pelo declive do fundo, sendo usualmente estabelecido recorrendo ao número de Iribarren modificado, dado por:

$$\xi_0 = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H_0}{L_0}}} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que $\tan \alpha$ é o declive do fundo em relação à direcção da onda, H_0 a altura da onda em águas profundas (ao largo), H_b a altura da onda na rebentação e L_0 o comprimento de onda ao largo. No Quadro 1 apresenta-se uma classificação do tipo de rebentação em função do número de Iribarren (Battjes, 1974).

Quadro 1. Classificação do tipo de rebentação em função do número de Iribarren (Battjes, 1974).

Tipo de rebentação	Número de Iribarren
Progressiva	$\xi_b < 0.5$
Mergulhante	$0.5 < \xi_b < 3.3$
De fundo	$\xi_b > 3.3$

3. MODELO FÍSICO

3.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Como se referiu no ponto 2, um dos parâmetros cruciais para permitir a prática de surf está relacionado com o tipo de rebentação. Em geral, pretende-se obter uma rebentação de tipo mergulhante, que corresponde a valores do número de Iribarren entre 0.5 e 3.3, indicado para surfistas de nível médio e avançado.

Para verificar se a geometria de um recife permite que ondas incidentes de determinadas características rebentem como se pretende recorre-se, em geral, ao número de Iribarren, utilizando no seu cálculo um declive de fundo que poderá corresponder ao declive do fundo na zona do recife ou a um declive que tenha em conta o declive do próprio recife. A influência da variação da dissipação de energia no recife em função do material de que é construído não é tida em conta, considerando-se, na modelação numérica, que a estrutura do recife é impermeável, contínua e estável. Na realidade, caso o recife seja construído com sacos de material geotêxtil preenchidos com areia, estes são porosos, geram bolsas de ar no seu interior e a sua estrutura sofre adaptações ao local de implantação até atingir um equilíbrio dinâmico, com alterações na configuração da parte superior dos sacos e algum afastamento entre eles, podendo afectar a rebentação.

Os ensaios realizados possibilitaram assim estudar a influência da geometria e do tipo de material de construção do recife na localização da rebentação e no tipo de rebentação. Com base nos resultados dos ensaios, foram analisadas as influências destas características do recife no valor do número de Iribarren e na variação das alturas médias ao longo do canal.

As geometrias do recife testadas foram escolhidas de modo a que ocorresse rebentação sobre o recife e que a rebentação fosse do tipo mergulhante, assumindo para tal uma profundidade máxima no canal de $0.8 \cdot H_b$ (Kaminsky e Kraus, 1993), sendo o valor da altura de onda na rebentação H_b no mínimo igual a $1.0 \cdot H_0$.

3.2. CARACTERÍSTICAS DO MODELO

Os ensaios foram realizados no Pavilhão de Hidráulica Marítima do LNEC, Figura 2, num canal com 73 m de comprimento, 3 m de largura e 2 m de profundidade, munido de um gerador de ondas irregulares.



Figura 2. Vista do canal onde se realizaram os ensaios.

Foram realizados ensaios para dois tipos de recifes: um impermeável, com fundo rígido, e outro composto por sacos de material geotêxtil preenchidos com areia (Figura 3). Para cada um destes tipos foram estudadas duas geometrias de recife (geometria baixa, Figura 4, e geometria alta, Figura 5), que diferem entre si na cota do pé da estrutura, mantendo-se o declive do talude de barlar e a cota de coroamento constantes. Neste artigo apresentam-se os resultados obtidos em três casos: o recife impermeável, com geometrias baixa e alta, e o recife composto por sacos de material geotêxtil, com geometria baixa. Os ensaios para o recife composto por sacos de material geotêxtil com geometria alta irão decorrer brevemente.

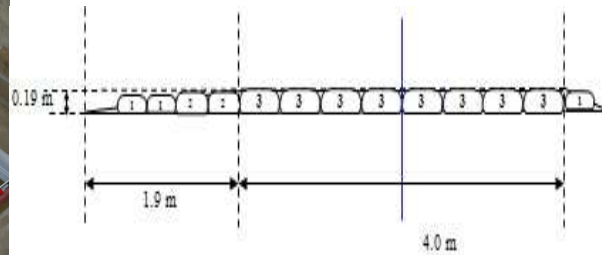
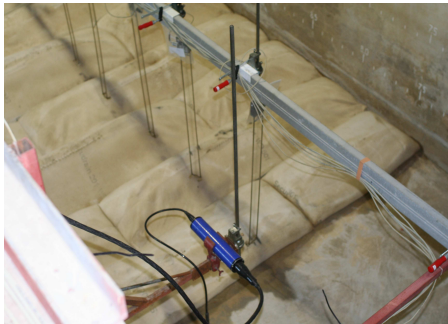


Figura 3. Esquerda: Recife artificial composto por sacos de material geotêxtil preenchidos com areia. Direita: Esquema dos sacos de material geotêxtil no canal para a geometria baixa.

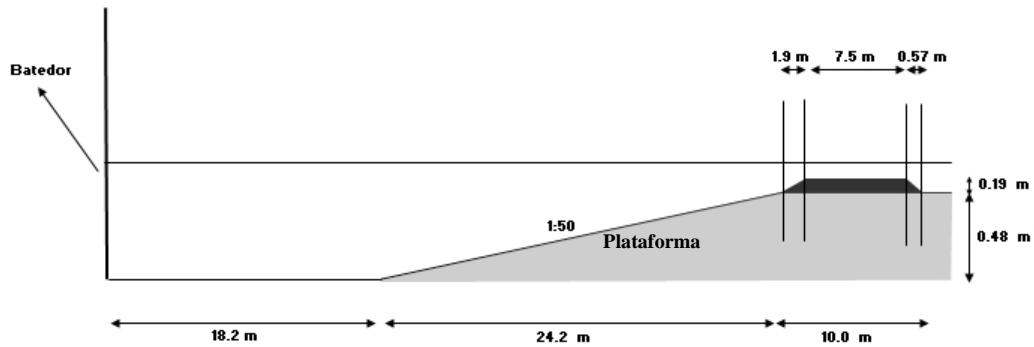


Figura 4: Esquema de recife com geometria baixa.

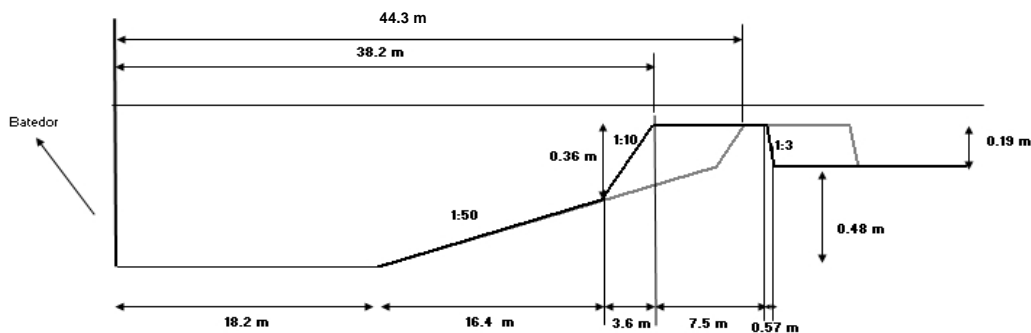


Figura 5: Esquema de recife com geometria alta.

A geometria e as características do recife baseiam-se no esquema proposto em ten Voorde *et al.*, 2009, constando de um recife em forma de delta com um ângulo constante de 66° . O declive da praia considerado refere-se a valores susceptíveis de ocorrerem em praias da costa Oeste Portuguesa. A largura do recife é considerada igual ao comprimento de onda junto ao gerador.

O modelo corresponde a uma secção do recife artificial cujas características se apresentam na Figura 4 e na Figura 5 e foi construído e explorado à escala geométrica 1:10, de acordo com a lei de semelhança de Froude.

O declive do recife na zona de sotamar foi considerado constante e igual a 1:10 ($\tan \alpha$) e na zona de barlamar foi considerado um declive de 1:3. A plataforma onde se encontra o recife possui um declive ($\tan \beta$) de 1:50 e o seu comprimento ($L_{\text{plataforma}}$) é de 24.2 m para o recife com a geometria baixa (caso 1 e caso 3) e de 16.4 m para o caso do recife com geometria alta (caso 2). Estes valores correspondem no mínimo a 1.5 vezes o comprimento de onda na zona de geração da onda, junto ao batedor, para cada profundidade testada. Todos estes valores encontram-se resumidos no Quadro 1.

Quadro 1. Valores dos parâmetros e identificação do material utilizado nos 3 casos de estudo.

Caso	1 - Baixa	2 - Alta	3 - Baixa
Material	Cimento	Cimento	Geotêxtil
Altura do recife (m)	0.19	0.36	0.19
$\tan \alpha$	1:10	1:10	1:10
$\tan \beta$	1:50	1:50	1:50
Altura da plataforma (m)	0.48	0.33	0.48
$L_{\text{plataforma}}$ (m)	24.2	16.4	24.2

3.3. INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

Em cada ensaio procedeu-se à medição da variação da superfície livre em 8 pontos ao longo do canal (Figura 6), à filmagem, de forma a observar as condições de rebentação, e à execução de fotografias, de forma a verificar as condições de rebentação.

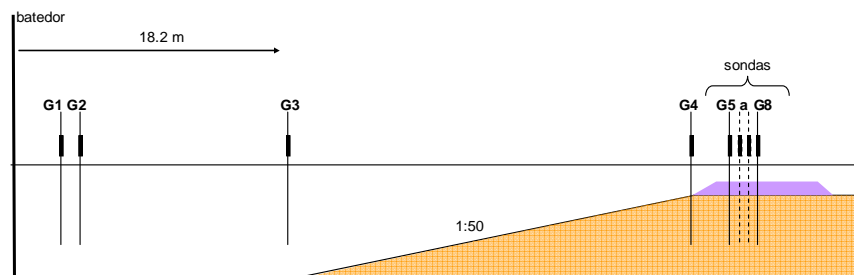


Figura 6. Representação esquemática da localização das sondas ao longo do canal.

Para medir a variação da superfície livre nos referidos pontos usaram-se simultaneamente 8 sondas resistivas, Figura 6; duas das quais (G1 e G2) mantiveram-se inalteradas ao longo de todos os ensaios para garantir a repetibilidade e o controlo de qualidade dos ensaios efectuados. As restantes 6 sondas (G4 a G8) foram colocadas em duas posições diferentes, Pos1 e Pos2, distando as sondas entre estas duas posições de 25 cm. Para cada condição de agitação incidente foram efectuados 2 ensaios, um correspondente à Pos 1 e outro à Pos2 das 6 sondas.

Foi implementada nas janelas do canal uma quadricula de espaçamento 10 cm \times 10 cm, conforme se mostra na Figura 7, o que facilitou a leitura da altura de onda na rebentação e a identificação do tipo de rebentação.



Figura 7. Quadricula implementada no canal.

Para os ensaios com o recife composto por sacos de material geotêxtil preenchidos com areia efectuaram-se medições da velocidade com um ADV localizado num ponto a barlar da estrutura (Figura 3).

3.4. CONDIÇÕES DE ENSAIO

Para cada geometria ensaiada foram realizados 96 (48 \times 2) ensaios regulares e 6 (3 \times 2) irregulares, cujas características foram definidas por ten Voorde *et al.* (2009). Os ensaios regulares que correspondem a 16 combinações de valores da altura de onda (H variando entre 0.10 m e 0.35 m), e da altura de água junto ao bateador ($h = 0.75$ m, 0.83 m, 0.87 m e 0.91 m). Cada condição de ensaio (H), foi testada para três períodos de onda ($T = 2.52$ s, 2.84 s e 3.16 s). As condições de agitação ensaiadas para as ondas irregulares (Quadro 3) correspondem a três combinações de valores de período de pico ($T_p = 2.52$ s, 2.84 s e 3.16 s), mantendo-se a altura de onda junto ao bateador constante ($h = 0.79$ m) e a altura de onda significativa ($H_s = 0.15$ m).

Os ensaios de ondas regulares tiveram uma duração de 410 s, o que corresponde a um mínimo de 100 ondas. Para as condições de agitação irregular foi usado um espectro JONSWAP, com um factor de esbelteza de pico $\gamma = 3.3$. Estes ensaios tiveram uma duração de cerca de 3300 s, o que corresponde a um mínimo de 1000 ondas.

Como referido anteriormente, os ensaios, para cada condição de agitação incidente foram realizados 2 vezes, com as sondas na Pos1 e na Pos2 respectivamente.

Em cada ensaio procedeu-se à identificação do tipo de rebentação de forma visual, à execução de fotografias de forma a observar as condições de rebentação e à filmagem dos ensaios através da colocação de uma câmara de vídeo na zona de rebentação da onda.

Como referido anteriormente, a ocorrência de rebentação foi obtida assumindo ser necessária uma profundidade máxima no canal de $0.8 \times H_b$ (Kaminsky e Kraus, 1993), sendo o valor da altura de onda na rebentação H_b no mínimo igual a $1.0 \times H_0$. Para a maioria das alturas de onda testadas foi considerada uma altura de água máxima sobre o recife de $s = 0.8 \times H_b$. No entanto, para testar a ocorrência de rebentação para valores de s superiores a $0.8 \times H_b$ foram também testadas alturas de onda com valores de $s(m) = 0.8 \times H_b + 0.04$ ou $s(m) = 0.8 \times H_b + 2 \times 0.04$.

No Quadro 2 e Quadro 3 resumem-se as condições ensaiadas para as situações de recife impermeável e recife de material geotêxtil.

Quadro 2. Condições ensaiadas para as ondas regulares (h = profundidade, H = altura de onda, s = altura de água sobre o recife e T = período de onda.

H (m)	s (m)	h (m)	T (s)
0.10	0.08	0.75	2.52, 2.84, 3.16
	0.12	0.79	
0.15	0.08	0.75	
	0.12	0.79	
	0.16	0.83	
0.20	0.20	0.87	
	0.12	0.79	
	0.16	0.83	
	0.20	0.87	
0.25	0.24	0.91	
	0.16	0.83	
	0.20	0.87	
0.30	0.24	0.91	
	0.20	0.87	
0.35	0.24	0.91	

Quadro 3. Condições ensaiadas para as ondas irregulares (h = profundidade, H_s = altura de onda significativa, s = altura de água sobre o recife e T_p = período de pico.

H_s (m)	s (m)	h (m)	T_p (s)
0.15	0,12	0,79	2.52, 2.84, 3.16

3.5. PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Após a construção do modelo e a sua implementação no canal, efectuaram-se uma série de ensaios preliminares com vista à verificação da operacionalidade do modelo.

Os ensaios iniciaram-se para a situação de recife impermeável. O procedimento diário envolveu:

- a) a calibração das sondas;
- b) o acerto do nível da superfície livre a ensaiar;
- c) a realização de ensaios para todas as condições de agitação incidente (T ou T_p , H ou H_s e h).

A aquisição de dados de variação da superfície livre foi feita a uma frequência de 25 Hz, através do programa SAM, Capitão (2002). A aquisição dos dados do ADV foi realizada com um programa próprio fornecido pela Nortek (CollectV33). Em cada ensaio foi identificado o tipo de rebentação quer visualmente, quer através de fotografias e filmagens.

Após terminados os ensaios correspondentes à situação com recife artificial impermeável, procedeu-se à implantação no modelo físico da solução de recife artificial com sacos de material geotêxtil preenchidos com areia.

Os ensaios iniciaram-se para esta nova situação do mesmo modo que os ensaios anteriores.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os dados de variação da superfície livre adquiridos nas sondas foram tratados com dois programas: um que utiliza o método do passo ascendente por zero, obtendo-se os valores da altura de onda média H_m e do período de onda médio T_m , em cada sonda, e outro, SAM, que trabalha no domínio da frequência, obtendo-se valores da altura de onda significativa H_s e do período de pico T_p .

Assim, obtiveram-se os resultados da altura de onda significativa para cada uma das três geometrias e para todas as posições das sondas ao longo do canal (incluindo Pos1 e Pos2). Estes resultados permitiram analisar a zona mais provável de rebentação, observada através de uma diminuição brusca do valor de H_s . A título de exemplo, e para uma condição de agitação e de altura de água sobre o recife, apresenta-se na Figura 8 a comparação entre os resultados obtidos para a geometria baixa com estrutura impermeável (EIGB) e para a geometria composta por sacos de material geotêxtil (EGGB). Na Figura 9 apresenta-se a comparação entre os resultados obtidos para a geometria baixa (EIGB) e para a geometria alta (EIGA) para o caso de recife impermeável.

Observa-se na Figura 8 e na Figura 9 que os valores de H_s obtidos para os ensaios nas duas posições são coerentes e próximos entre si, o que nem sempre acontece, existindo, em alguns casos, uma variação no valor da altura de onda H_s da Sonda 1 (Figura 10).

A rebentação ocorre primeiro para os recifes EGGB e EIGA do que para os recifes EIGB, verificando-se um desvio de cerca de 6 m entre ambos.

A configuração EIGA induz a um aumento da altura de onda H_s ao longo do canal.

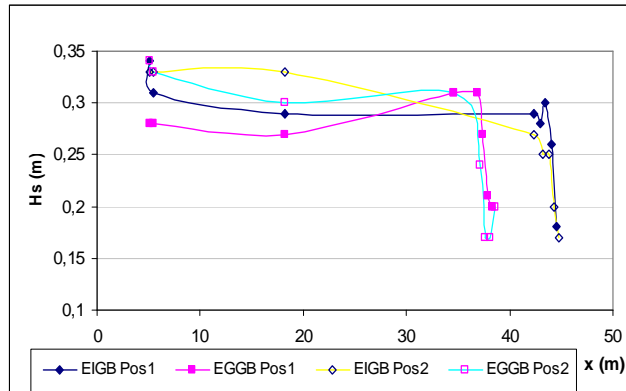


Figura 8. Comparação da altura de onda significativa H_s para as geometrias EIGB e EGGB nas duas posições das sondas (Pos1 e Pos2) para a condição $h = 0.87$ m, $H = 0.25$ m e $T = 2.52$ s.

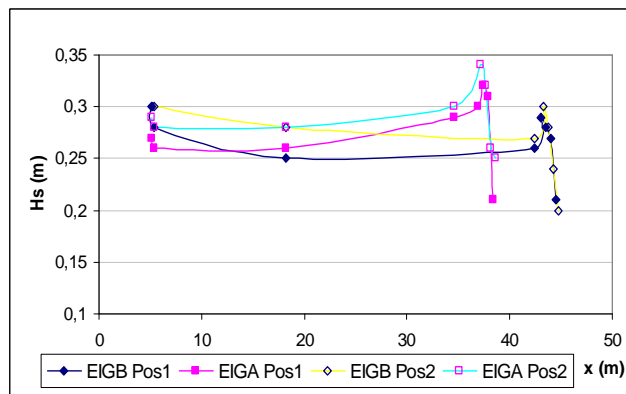


Figura 9. Comparação da altura de onda significativa H_s para as geometrias EIGB e EIGA nas duas posições das sondas (Pos1 e Pos2) para a condição $h = 0.87$ m, $H = 0.25$ m e $T = 3.16$ s.

Os ensaios realizados com as sondas nas duas posições Pos1 e Pos2, distantes entre si de 25 cm, possibilitam uma maior discretização do canal e mais informação para cada condição de agitação. No entanto, porque as leituras efectuadas em cada posição correspondem a ensaios distintos, por vezes os dados não são consistentes entre si, especialmente no que se refere ao valor da altura de onda medido na Sonda 1, como se mostra para a condição $h = 0.87$ m, $H_s = 0.20$ m e $T_p = 316$ s, Figura 10. Também se observam, em alguns casos, variações bruscas da altura de onda em determinadas sondas, que podem ser consequência da diferença no valor de altura de onda incidente, do fenómeno de reflexão ou da presença de harmónicas no canal.

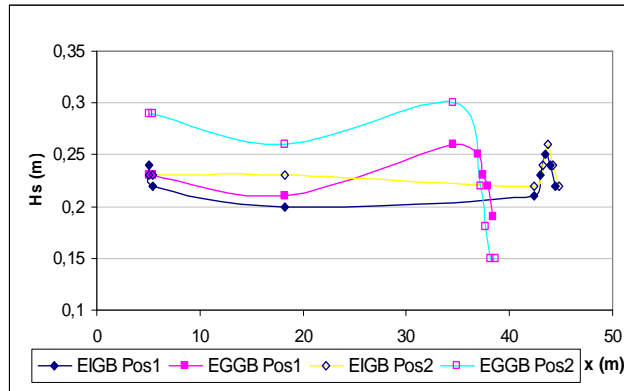


Figura 10. Comparação da altura de onda significativa H_s para as geometrias EIGB e EGGB nas duas posições das sondas (Pos1 e Pos2) para a condição $h = 0.87$ m, $H = 0.20$ m e $T = 3.16$ s.

Da observação dos ensaios, da análise das imagens das fotografias e vídeos e da confirmação posterior dos valores de H_s , determinou-se o tipo de rebentação de cada ensaio. A título de exemplo, apresentam-se nas Figuras 11 à 13 a rebentação observada em cada um dos três casos estudados (geometria baixa, EIGB, e geometria alta, EIGA, para recife impermeável e geometria baixa para recife composto por sacos de material geotêxtil, EGGB), juntamente com o valor do número de Iribarren correspondente.



Figura 11. Rebentação observada nos ensaios para $h = 0.75$ m, $H = 0.10$ m e $T = 2.84$ s.

EIGB, $Ir = 0.65450$



EIGA, $Ir = 0.98080$



EGGB, $Ir = 0.85318$



Figura 12. Rebentação observada nos ensaios para $h = 0.87$ m, $H = 0.15$ m e $T = 2.84$ s

EIGB, $Ir = 0.64699$



EIGA, $Ir = 0.74454$



EGGB, $Ir = 0.67751$



Figura 13. Rebentação observada nos ensaios para $h = 0.87$ m, $H = 0.20$ m e $T = 2.52$ s.

O Quadro 4 resume os resultados obtidos em todos os ensaios de agitação regular no que se refere ao tipo de rebentação verificado e aos valores de H_m e T_m medidos na sonda junto ao batedor.

Quadro 4. H_m e T_m obtidos na Sonda 1 e respectivo tipo de rebentação observado nos ensaios (MERG = mergulhante e COLAP = progressiva).

	EIGB			EIGA			EGGB		
	H_m (m)	T_m (s)	EXP	H_m (m)	T_m (s)	EXP	H_m (m)	T_m (s)	EXP
D75_H10_T252	0.067	1.895	MERG	0.083	2.473	MERG	0.101	2.520	MERG
D75_H10_T284	0.061	1.838	MERG	0.080	2.496	MERG	0.108	2.840	MERG
D75_H10_T316	0.057	2.046	MERG	0.087	2.808	COLAP	0.118	3.160	COLAP
D75_H15_T252	0.118	2.404	COLAP	0.126	2.519	COLAP	0.143	2.520	MERG
D75_H15_T316	0.120	2.782	COLAP	0.130	3.158	COLAP	0.160	3.160	MERG
D79_H10_T252	0.084	2.520	COLAP	0.082	2.520	COLAP	0.088	2.520	COLAP
D79_H10_T284	0.089	2.841	COLAP	0.085	2.780	COLAP	0.090	2.841	MERG
D79_H10_T316	0.087	3.160	COLAP	0.082	3.084	MERG	0.089	3.159	MERG
D79_H15_T252	0.122	2.520	COLAP	0.134	2.520	MERG	0.131	2.521	COLAP
D79_H15_T284	0.135	2.843	COLAP	0.135	2.841	MERG	0.133	2.841	COLAP
D79_H15_T316	0.128	3.161	COLAP	0.131	3.162	MERG	0.133	3.161	COLAP
D79_H20_T252	0.176	2.520	COLAP	0.178	2.519	MERG	0.177	2.520	COLAP
D83_H15_T252	0.129	2.520	MERG	0.141	2.521	COLAP	0.122	2.520	MERG
D83_H15_T284	0.134	2.841	COLAP	0.143	2.840	COLAP	0.124	2.841	MERG
D83_H15_T316	0.120	3.160	COLAP	0.135	3.161	COLAP	0.135	3.160	MERG
D83_H20_T252	0.176	2.520	MERG	0.192	2.521	MERG	0.165	2.519	COLAP
D83_H20_T284	0.189	2.840	MERG	0.203	2.841	MERG	0.084	2.840	MERG
D83_H20_T316	0.166	3.160	MERG	0.185	3.163	MERG	0.092	3.046	COLAP
D87_H15_T252	0.179	2.472	COLAP	0.136	2.519	COLAP	0.160	2.520	MERG
D87_H15_T284	0.288	2.811	COLAP	0.131	2.841	MERG	0.173	2.840	MERG
D87_H20_T252	0.232	2.494	MERG	0.179	2.521	MERG	0.216	2.520	MERG
D87_H20_T316	0.179	3.161	COLAP	0.168	3.160	MERG	0.219	3.160	COLAP
D87_H25_T316	0.237	3.162	MERG	0.225	3.161	MERG	0.100	2.730	COLAP
D91_H20_T252	0.261	2.441	MERG	0.178	2.521	COLAP	-	-	-
D91_H30_T316	0.229	3.160	COLAP	0.298	3.158	MERG	-	-	-
D91_H35_T316	0.276	3.161	MERG	0.335	3.161	MERG	-	-	-

Verifica-se que o tipo de rebentação varia entre progressiva e mergulhante, com maior ocorrência desta última para a estrutura impermeável e geometria alta. No entanto, o número de Iribarren teórico apresenta, para os três casos e para todas as condições estudadas, a forma de rebentação do tipo mergulhante, com valores do número de Iribarren entre 0.5 e 3.3. Este valor foi calculado com base na equação 1, considerando como H_0 o valor de altura de onda média H_m na Sonda 1, situada a cerca de 5.1 m do batedor, e como $\tan \alpha$ o declive local, com um valor de 1:10 em todos os ensaios.

Esta diferença deve ser cuidadosamente considerada, podendo ser consequência de vários factores: a utilização, na equação do número de Iribarren teórico, de um valor do declive do

talude menos adequado ou a existência de processos hidrodinâmicos não contemplados naquela equação (devido ao uso de materiais porosos), como explicado no ponto 3.1.

Da análise dos resultados apresentados no Quadro 4, observa-se ainda que o tipo de rebentação nas três estruturas é semelhante, variando, no entanto, a posição da rebentação; para a estrutura impermeável com geometria alta (EIGA) e para a estrutura de material geotêxtil com geometria baixa (EGGB), ocorrendo esta antes do observado para a estrutura impermeável com geometria baixa (EIGB). A comparação dos resultados, para geometria baixa, entre a estrutura impermeável (EIGB) e a estrutura composta com sacos de material geotêxtil (EGGB) mostra que a onda nesta última rebenta aproximadamente no final do talude, enquanto para a estrutura impermeável rebenta sobre o talude. Verifica-se ainda maior turbulência na zona de rebentação nos ensaios realizados com sacos de material geotêxtil do que a observada na estrutura impermeável. Isto deve-se possivelmente às concavidades que se criam entre os sacos de material geotêxtil que constituem o recife e nas quais se geram bolhas de ar que são arrastadas concentrando-se na zona de rebentação.

Da análise dos gráficos representativos da altura de onda significativa em função da posição das sondas ao longo do canal verifica-se que o aumento da altura do recife (EIGA) afasta a rebentação desta estrutura de cerca de 6 m na maioria dos casos.

Foram também medidos pelo ADV, para o recife de material geotêxtil com geometria baixa, os valores das três componentes da velocidade, V_x , V_y e V_z , e calculado o respectivo módulo da velocidade. Na Figura 14 apresentam-se, a título de exemplo, os resultados obtidos para a profundidade $h = 0.87$ m, considerando as respectivas alturas de onda e os períodos de onda ensaiados.

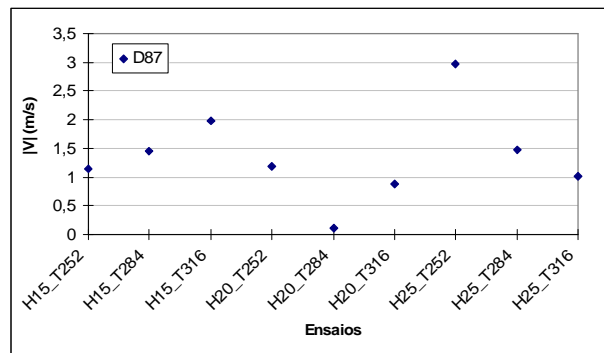


Figura 14. Módulo da velocidade para cada ensaio realizado com a estrutura de material geotêxtil e geometria baixa, para $h = 0.87$ m e as diversas alturas de onda H_m e dos períodos de onda T_m ensaiados.

Da análise dos dados da velocidade num ponto medidos com o ADV para o caso da estrutura de material geotêxtil e geometria baixa, não foi possível estabelecer nenhum padrão que relacione o módulo da velocidade com a profundidade do recife ou a altura de onda. Para alguns casos verificou-se que a um aumento do valor do período da onda corresponde um maior valor do módulo da velocidade, mas não em todos.

5. CONCLUSÕES

Neste artigo apresenta-se o estudo, em modelo físico, da propagação de ondas sobre uma secção transversal de um recife artificial. Foram ensaiados dois tipos de recifes: um impermeável, com fundo rígido, e outro composto por sacos de material geotêxtil preenchidos com areia. Para cada um destes tipos foram estudadas duas geometrias de recife, que diferiam

entre si no nível do pé da estrutura mantendo-se o declive do talude de montante e a cota de coroamento constantes. Para cada geometria foram ensaiadas 18 condições de agitação, tendo incluído agitação regular e irregular e diferentes valores de período e altura de onda.

Os ensaios foram realizados no LNEC num canal de ondas irregulares. Ao longo do canal foram colocadas 8 sondas resistivas para registo da variação da superfície livre ao longo do canal; foram ainda realizados vídeos e tiradas fotografias para verificação das características da rebentação. Para uma das geometrias testadas, constituída por sacos de material geotêxtil, efectuaram-se ainda medições de velocidade através de um Acoustic-Doppler Velocimeter (ADV) localizado num ponto a montante da estrutura. Conclui-se que o tipo de rebentação varia entre progressivo e mergulhante, com maior ocorrência deste último para a estrutura impermeável e geometria alta. É de referir que o tipo de rebentação previsto pela aplicação do número de Iribarren seria, para todos os casos, o mergulhante, o que indica que este poderá não ser o parâmetro mais adequado para este tipo de estruturas.

O tipo de rebentação nas três estruturas é semelhante, variando, no entanto, a posição da rebentação. A rebentação para a estrutura composta por sacos de material geotêxtil (geometria baixa) ocorre aproximadamente no final do talude, enquanto para a estrutura impermeável e com o mesmo tipo de geometria rebenta sobre o talude. Para a estrutura impermeável com geometria alta verifica-se que a rebentação ocorre antes do observado para a mesma estrutura com geometria baixa. Verifica-se ainda maior turbulência na zona de rebentação nos ensaios realizados com os sacos de material geotêxtil.

6. REFERÊNCIAS

Battjes, J.A., 1974. Surf Similarity. *Proc. of International Conference on Coastal Engineering* (Copenhagen, Denmark), pp. 466-479.

Capitão, R. (2002). Modelação estocástica numérica e física da agitação marítima. Tese de doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Lisboa, Abril de 2002.

Kaminski, G., and Kraus, N.C., 1993. Evaluation of depth-limited wave breaking criteria. *Waves '93*, Amer. Soc. Civil Engrs, pp. 180-193.

ten Voorde, M., Antunes do Carmo, J.S., Neves, M.G. and Mendonça, A., 2009. Designing a Preliminary Multi-Functional Artificial Reef to Protect the Portuguese Coast, *Journal of Coastal Research*, 25(1), pp 69-79.