



MODELAÇÃO FÍSICA DE UM QUEBRA-MAR DESTACADO COM DIFERENTES ÂNGULOS DE IMPLANTAÇÃO: ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONDIÇÕES DE SURFABILIDADE

¹Ana Mendonça; ²Carolina Martinez, ¹Maria da Graça Neves, ¹Conceição Fortes; ¹Rui Reis; ³Pedro Bicudo, ¹Francisco Sancho

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Departamento de Hidráulica e Ambiente

²Instituto Superior de Educação e Ciência

³Instituto Superior Técnico, Departamento de Física

amendonca@lnec.pt; cmartinez@lnec.pt; gneves@lnec.pt; jfortes@lnec.pt; rreis@lnec.pt;

bicudo@tecnico.ulisboa.pt; fsancho@lnec.pt

Resumo

No âmbito do “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira”, entre a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. e o Consórcio LNEC, UAVEIRO e IST, foram realizados ensaios 3D num tanque de ondas, do Pavilhão de Marítima do LNEC, para analisar as condições hidrodinâmicas em torno de um quebra-mar destacado (QMD) submerso.

Pretende-se que este QMD seja multifuncional, reduzindo o risco de galgamentos costeiros no aglomerado urbano da Praia da Vagueira, promovendo o acréscimo do areal da praia emersa em frente à defesa aderente, reforçando a defesa natural contra a erosão e inundações costeiras, fomentando o maior usufruto desta praia pela população e segurança balnear, e potenciando a criação de ondas de referência para o surf, e consequente reforço da economia associada a esta atividade.

Neste artigo analisa-se a influência da orientação do QMD relativamente à linha de costa - paralelo à linha de costa ou com uma obliquidade de 45 ° - nas condições de rebentação da onda e nos parâmetros de surfabilidade, como a amplificação de onda, comprimento da linha de rebentação e tipo de rebentação (Mendonça et al., 2021; Oliveira et al., 2020). Para condições de agitação regular apresentam-se as principais diferenças no padrão de ondas e tipo de rebentação esperadas, quer na estrutura, quer junto à linha de costa.

Introdução

A Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. e o Consórcio LNEC, UAVEIRO e IST colaboraram na realização do “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira” (Figura 1).



Figura 1. Vagueira (Fonte: Google Earth)

O estudo tem como objetivo a caracterização e definição de parâmetros de dimensionamento e localização de um quebra-mar destacado, em frente à Praia da Vagueira (Município de Vagos, distrito de Aveiro) cumprindo os seguintes objetivos por ordem de prioridades:

- Reduzir o risco de galgamentos costeiros no aglomerado urbano da Praia da Vagueira;
- Promover o eventual acréscimo do areal da praia emersa em frente à defesa aderente; reforçando a defesa natural contra a erosão e inundação costeira e fomentando o seu maior usufruto pela população e segurança balnear;
- Criar condições físicas para promover ondas de surf de referência, potenciando a economia associada a esta atividade.

No âmbito deste vasto estudo, realizaram-se ensaios em modelo físico para análise do efeito do quebra-mar na dinâmica sedimentar da praia e na geração de ondas do surf, para duas orientações do QMD. Os ensaios foram efetuados em 3 fases:

- Fase 1 – Ensaio sem QMD
- Fase 2 – Ensaio com QMD paralelo à costa
- Fase 3 - Ensaio com QMD oblíquo a 45°.

No presente trabalho, descrevem-se os ensaios que tiveram como objetivo analisar a promoção de ondas de referência para o surf em frente à Praia da Vagueira, na zona de eventual implementação do QMD. A análise centrou-se na identificação da localização, comprimento e tipo de rebentação, de forma a verificar a sua adequabilidade para a prática de surf.

Nas secções seguintes apresenta-se a descrição do modelo físico, equipamento experimental utilizado e condições de ensaio. Para as três fases de ensaios apresentam-se e analisam-se os resultados obtidos, para uma condição de agitação, relativos aos valores dos índices de agitação, localização e comprimento da linha de rebentação e tipo de rebentação.

Modelo físico

O objetivo dos ensaios de surf em cada uma das fases foi:

- Sem obra, para avaliação das condições de rebentação, quer na zona onde seria implantado o QMD quer junto à costa;



- Com o QMD, para avaliação das condições de rebentação adequadas para o surf na zona do QMD e junto à costa;
- Com o QMD oblíquo 45° graus relativamente à sua posição inicial, para avaliação das condições de rebentação adequadas para o surf na zona do QMD e junto à costa.

Descrição geral

O modelo físico foi construído nas instalações experimentais do Departamento de Hidráulica e Ambiente do LNEC, no tanque de ondas irregulares com aproximadamente 23,0 m de comprimento por 20,0 m de largura. A geração de ondas foi feita com recurso a dois geradores de ondas irregulares cujas pás têm 6,0 m de largura e 0,8 m de altura (Figura 2).

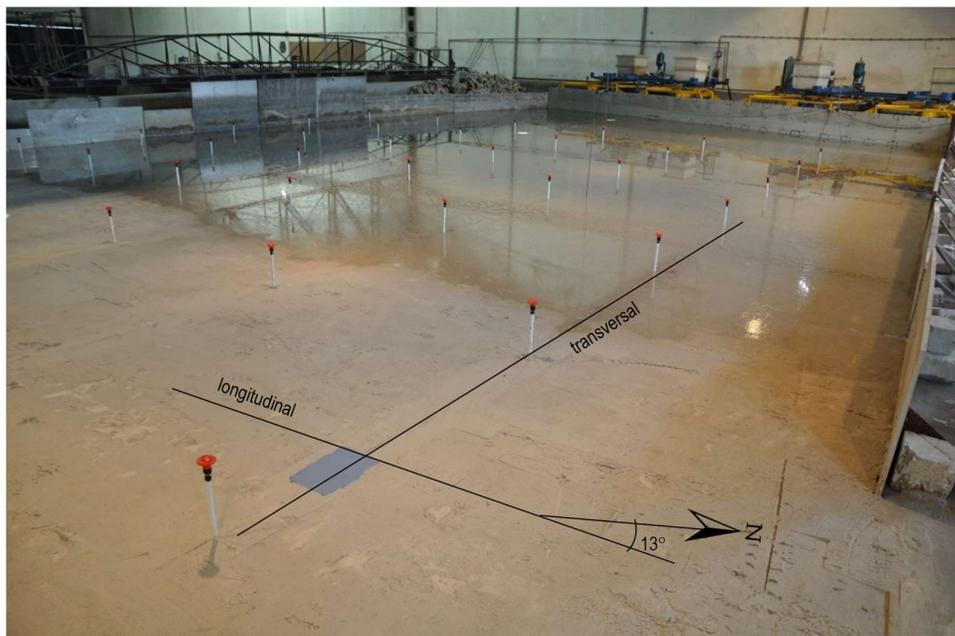


Figura 2. Aspeto do tanque de ondas onde foi construído o modelo físico, com indicação da orientação aproximada da direção longitudinal relativamente ao norte

O modelo foi construído e explorado de acordo com a lei de semelhança de Froude a uma escala geométrica de 1/65. A escala geométrica do modelo, Sancho *et al.* (2021), resultou do compromisso entre as dimensões do tanque de ondas, as dimensões da zona de estudo e das obras a implantar, as características e capacidades dos baterores de ondas e as condições de agitação marítima, tendo ainda em conta a dimensão do sedimento a utilizar no fundo móvel.

O modelo físico foi implantado sobre fundo móvel que reproduz as condições do protótipo desde uma batimétrica da ordem de -12 m (ZH) até junto à costa. A Figura 3 mostra a planta do modelo físico executado, a posição das linhas batimétricas do fundo e dos geradores de ondas. É também indicada a posição do QMD na primeira fase dos ensaios, Figura 3a. A posição do QMD na segunda fase dos ensaios é apresentada na Figura 3b e Figura 4.

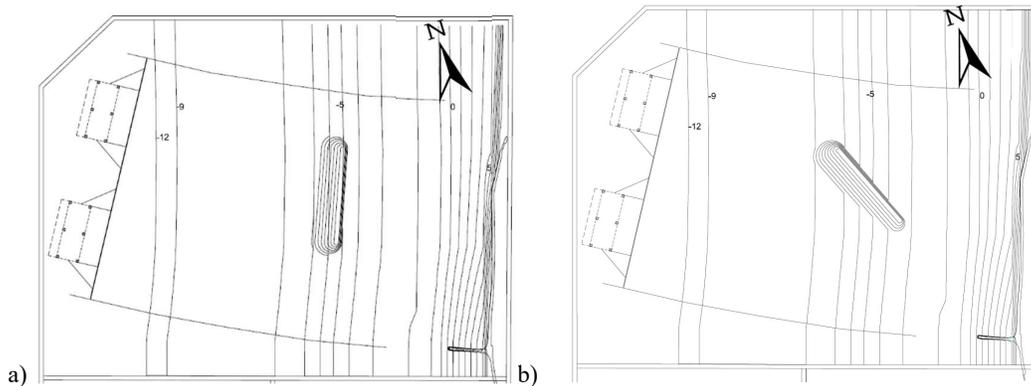


Figura 3. Planta do modelo físico construído, com implementação do QMD paralelo à linha de costa e rodado a 45°

Na 2ª fase dos ensaios, o QMD, com 300 m de comprimento, está colocado paralelo à linha de costa e distando desta 400 m; o seu coroamento situa-se à cota +0,34 m (ZH). A linha de costa é definida ao nível médio do mar, NMM=+2,17 m (ZH) (Sancho *et al.*, 2019). Este QMD foi construído à escala reduzida em módulos de betão com uma rugosidade exterior o mais aproximada possível da de um manto de enrocamento

Na 3ª fase dos ensaios, o QMD é rodado no sentido anti-horário (visto de cima), e posicionado de tal forma que a vertical do seu centro geométrico se encontrava na mesma posição que a correspondente vertical do QMD paralelo à linha de costa (usado na segunda fase), Figura 4c.

Equipamento experimental

Para a geração da agitação marítima nos ensaios utilizaram-se dois geradores de ondas irregulares com 6 m de comprimento e 0.8 m de altura, perfazendo uma frente de onda de 12 m, Figura 5.

Atendendo ao objetivo do estudo, procedeu-se à medição de parâmetros caraterísticos da agitação marítima em vários pontos do modelo e à filmagem dos ensaios de forma a observar as condições de rebentação.

Com vista ao registo da elevação da superfície livre foram colocadas 8 sondas resistivas em diversos pontos do modelo (S1 a S8). Para além das duas sondas de controlo colocadas junto aos geradores de ondas (S1 e S2), foi colocado um conjunto de 6 sondas resistivas numa grelha de pontos no modelo físico, de forma a avaliar as condições de rebentação na zona onde será implantado o QMD (S3 a S8). Assim, estas últimas sondas foram colocadas ao longo de uma perpendicular à praia e distanciadas entre si de 1 m, colocadas em suportes fixos num carro móvel de forma a poderem mudar de posição na direção paralela à direção de propagação das ondas (Figura 5a e Figura 5b). A sonda S6 estava alinhada com o coroamento do QMD, as sondas S3 a S5 estavam localizadas entre o QMD e a linha de costa, e as sondas S7 e S8 entre o QMD e a zona de geração. Os dados provenientes das sondas foram adquiridos com uma frequência de 128 Hz.

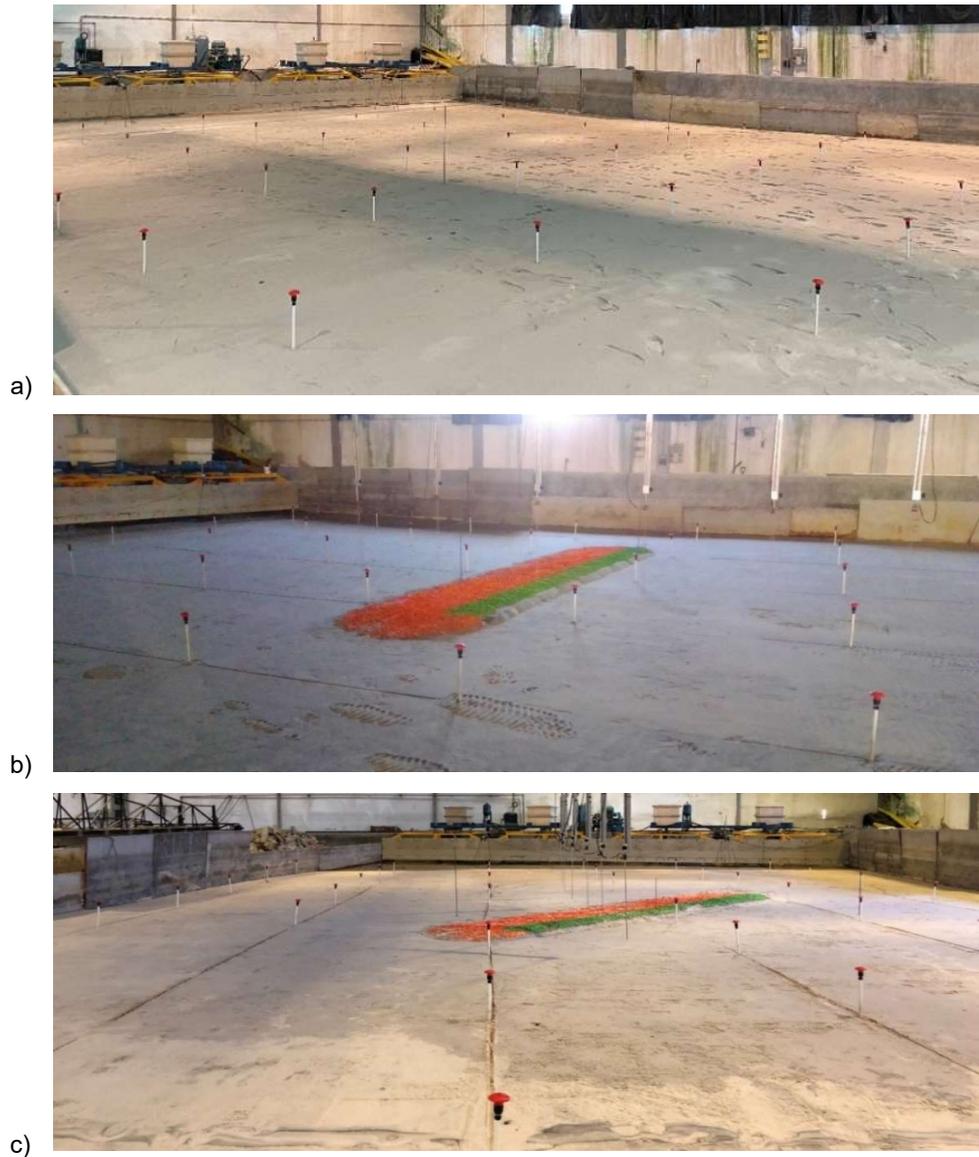


Figura 4. Aspeto da construção do modelo físico: a) sem o QMD; b) com o QMD paralelo à costa; c) QMD rodado de 45° em relação à sua posição inicial

Foram feitas medições com aquisição simultânea nas seis sondas (S3 a S8) em 5 posições diferentes, uma coincidente com o eixo transversal do QMD e as restantes distando deste 2 m para cada um dos seus lados e coincidindo com a grelha existente no modelo para georreferenciação das imagens, perfazendo um total de 30 posições de medição na proximidade do QMD, como se pode ver no esquema apresentado na Figura 5.

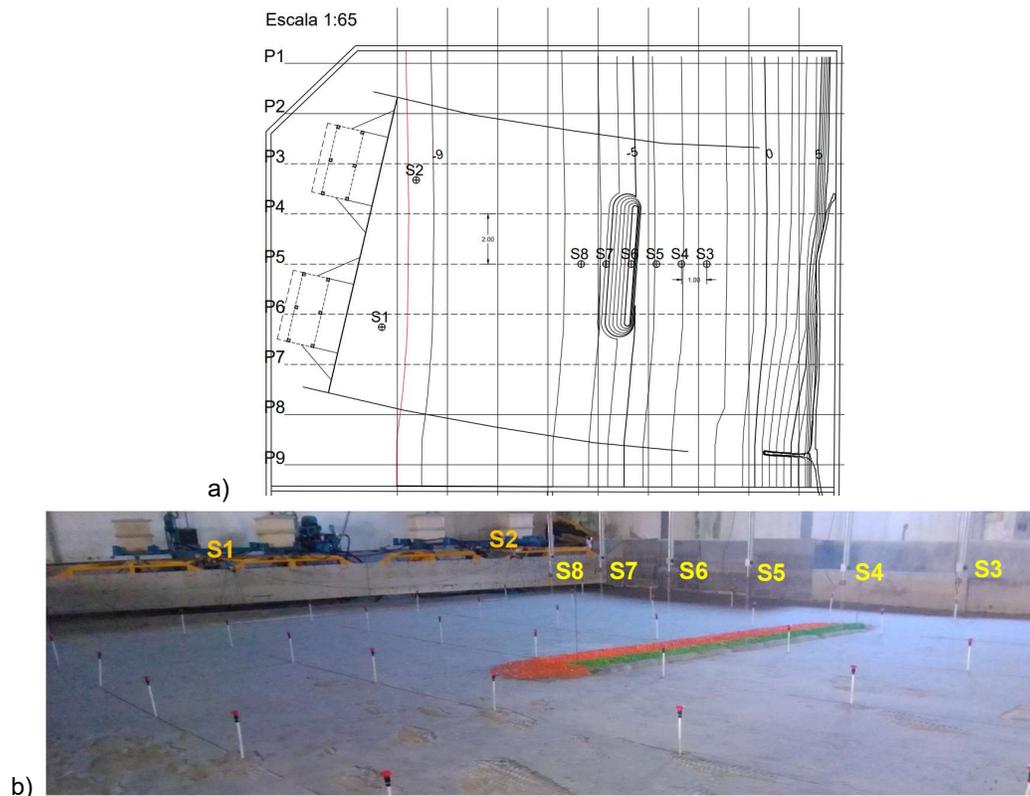


Figura 5. a) Esquema do posicionamento das sondas ao longo do tanque; b) Posicionamento das sondas e bater

Os registos fotográficos e em filme foram feitos com recurso a máquinas fotográficas de utilização corrente. Nos ensaios para a avaliação do surf, foram instaladas 2 câmaras de filmar para análise da localização, comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD e na costa, para cada condição de agitação marítima incidente. Em cada ensaio foram efetuadas filmagens com a câmara colocada lateralmente e numa posição no passadiço rolante superior, Figura 6.



Figura 6. Máquinas fotográficas e de filmar utilizadas no decorrer dos ensaios



Condições de ensaio

Foram realizados ensaios de agitação irregular e regular para com o nível médio de água, NMM (+2,17 m ZH), e rumo de 296 °N. Os ensaios de agitação regular são especialmente importantes para poder analisar em detalhe as características de rebentação da onda, com altura, H, e período, T, iguais a Hs e Tp dos ensaios de agitação irregular e mesmo nível de água. As condições de agitação marítima irregular foram simuladas de acordo com uma configuração espectral empírica do tipo JONSWAP (com fator de pico $\gamma=3.3$), o que permite a reprodução de grupos de ondas.

No Quadro 1 são apresentadas as condições de agitação utilizadas nos ensaios. Foram realizados 60 ensaios, dos quais 30 (6 condições de agitação x 5 ensaios por condição de agitação, correspondentes a cada posição do conjunto de 6 sondas) com agitação regular incidente e 30 com agitação irregular.

Quadro 1 – Condições de agitação dos ensaios de surf (à escala do protótipo)

H_s, H (m)	T_p, T (s)	Nível de água (m ZH)
1,5, 2 e 3	10 e 12	2,17

Resultados

Foi efetuada uma análise espectral dos sinais medidos em cada sonda, para obtenção da altura de onda significativa e período de pico respetivos. Com base nesses valores, foram calculados índices de agitação (IA) através da relação entre a altura de onda significativa medida em cada um dos pontos referidos anteriormente e a média das alturas de onda significativas registadas nas duas sondas colocadas à saída do gerador, situadas na batimétrica -12.0 m (ZH), para cada ensaio. A comparação de resultados sem e com o QMD nas duas posições permite avaliar o desempenho do QMD em termos de potenciar condições de surf na praia da Vagueira.

A identificação da posição da linha de rebentação foi baseada na observação visual e nas filmagens efetuadas durante os ensaios, que permitiram ainda a análise do comprimento e tipo de rebentação na zona do QMD.

Para cada condição de agitação, foram obtidos:

- Valores dos índices de agitação em cada ponto de medição, dados pela razão H/H_0 ou H_s/H_{s0} , sendo os valores do denominador os correspondentes aos valores medidos junto ao gerador;
- Localização, comprimento e tipo de rebentação.

Na Figura 7 e na Figura 8 apresentam-se os índices de agitação obtidos nos ensaios das três fases (sem QMD, QMD 0°, correspondente ao QMD paralelo à costa, e QMD 45°) juntamente com o perfil de fundo correspondente para cada um dos perfis em análise, P3 a P7, (apresentados na Figura 5). Nestes gráficos o eixo das abcissas tem início na linha de costa e a profundidade dos perfis tem a sua origem à cota -12 m (ZH).

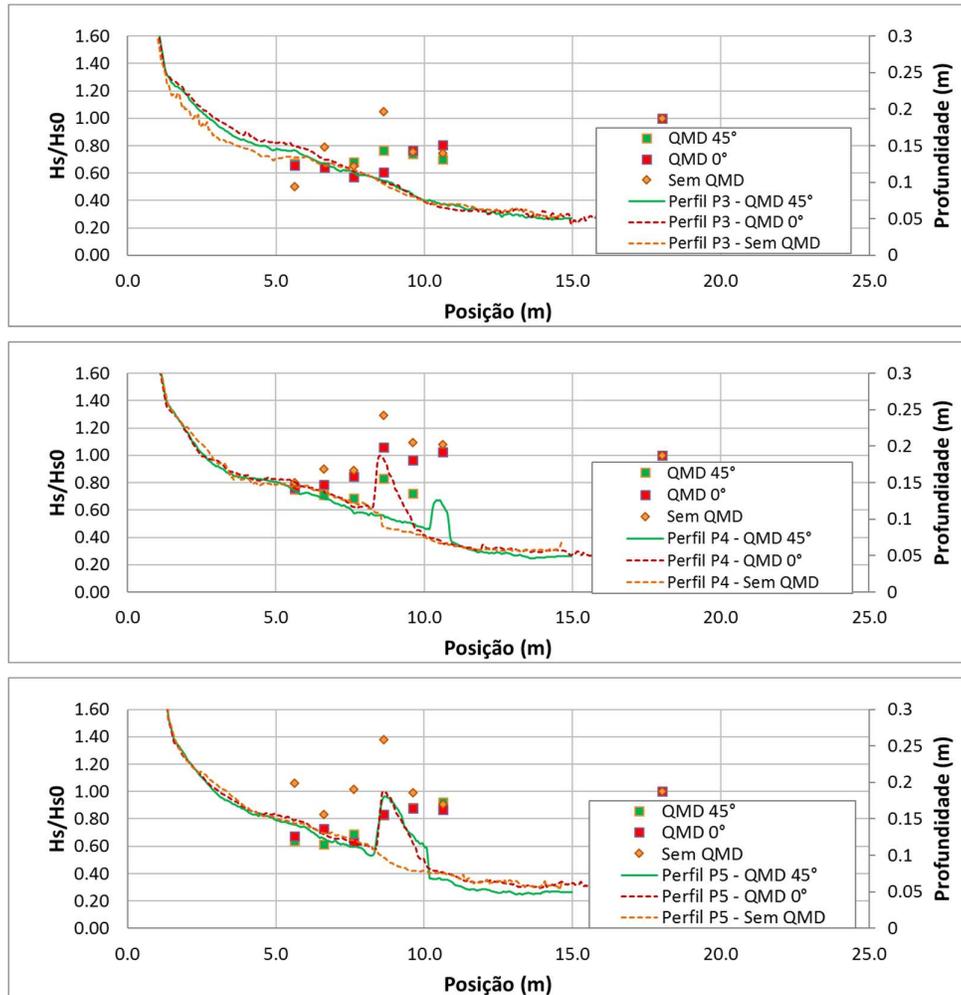


Figura 7. Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=2,0 m, posições P3 a P5. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

Dos resultados experimentais relativos aos índices de agitação e da análise visual dos ensaios é possível concluir que, para todas as condições de agitação ensaiadas:

- a rebentação na situação atual (sem QMD) ocorre a sotamar da posição de implantação prevista para o QMD, próxima da linha de costa;
- o QMD tem influência sobre as condições de rebentação, levando a que estas ocorram na zona próxima ou sobre o QMD.

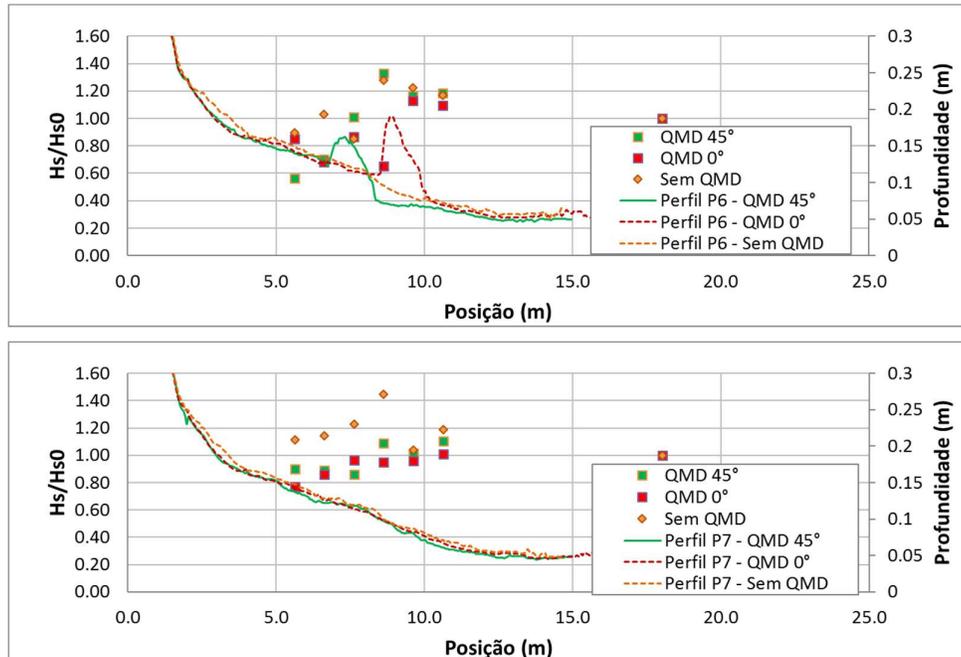


Figura 8. Ensaios sem QMD, QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: T=12 s; H=2,0 m, posições P6 e P7. Valores dos índices de agitação nas sondas S3 a S8

Em detalhe, nos ensaios com QMD, verificou-se que:

- ocorreu um aumento dos índices de agitação na zona do QMD devido à diminuição de profundidade e empolamento da onda, com posterior ocorrência de rebentação;
- a rebentação ocorreu sobre o QMD, na zona do coroamento deste (no caso dos ensaios com menores valores de Hs) ou sobre o talude de barlamar (para os ensaios com maiores valores de Hs);
- no caso dos ensaios com QMD 45°, as frentes de onda tenderam a ajustar-se à batimetria do QMD, alterando-se a direção de propagação da onda e as condições de rebentação, tornando as mais apropriadas para a prática de surf.
- No que se refere ao comportamento da rebentação por perfil nos ensaios com QMD, verificou-se que:
 - No perfil P3, mais a norte, os índices de agitação do QMD 45° diferem, em geral, mais do caso sem QMD que os do QMD 0°, já que aí o QMD 45° está localizado mais a sotamar. No perfil P7, mais a sul, ocorre o contrário, já que aí o QMD 45° está localizado mais a barlamar do QMD 0°;
 - No perfil P5, localizado no centro do QMD, verifica-se que a rebentação ocorre, em geral, mais a barlamar no QMD 45° que no QMD 0°. Esta diferença deve-se às diferenças de geometria entre estes dois QMD, já que no caso do QMD 45° a rebentação inicia-se na secção deste mais a norte que está localizada mais a barlamar que no caso do QMD 0°, onde todo o QMD está paralelo à costa e, aproximadamente, paralelo às batimétricas nesta zona;
 - Nos perfis P4 e P6 a rebentação dá-se, como referido, na zona do coroamento ou sobre o talude de barlamar.

Na Figura 9 apresenta-se a linha de rebentação observada nos ensaios sem QMD, com o QMD



na sua posição inicial (cerca de 0°) e rodado de 45°, para a condição de agitação regular $T=12$ s e $H=2,0$ m.



Figura 9. Ensaios sem QMD, com QMD 45° e QMD 0°. Agitação regular: $T=12$ s; $H=2,0$ m.
Linha de rebentação



Para o caso sem QMD, a rebentação dá-se junto à linha de costa. O tipo de rebentação é do tipo progressivo, sendo adequada para a prática do surf.

Para o caso com QMD 0°, verifica-se que a rebentação se localiza ao longo da estrutura. No entanto, embora o comprimento da linha de rebentação tenha alguma dimensão, a rebentação não se dá de forma gradual, não sendo adequada para a prática do surf.

Para o caso com QMD 45°, tal como para QMD 0°, a rebentação dá-se sobre a estrutura. O comprimento da linha de rebentação é inferior ao do caso QMD 0°, mas a rebentação é do tipo mergulhante e ocorre de forma gradual, sendo adequada para a prática de surf.

Comparando a linha de rebentação junto à costa no caso sem QMD e no caso do QMD 45° verifica-se que o seu comprimento se reduz, passando a ocorrer sobretudo fora da zona de sombra da estrutura. Tal pode indiciar que com QMD 45° as condições junto à costa vão piorar.

Da observação da posição e comprimento da linha de rebentação, assim como do tipo e forma de rebentação pode concluir-se que, dos casos ensaiados, no caso sem QMD e no caso QMD 45° se obtiveram condições de rebentação adequadas à prática de surf.

Conclusões

Apresentam-se neste artigo os ensaios realizados para analisar a influência da orientação de um QMD relativamente à linha de costa - paralelo à linha de costa ou com uma obliquidade de 45 ° - nas condições de rebentação da onda e nos parâmetros de surfabilidade,

Dos resultados experimentais relativos aos índices de agitação e da análise visual dos ensaios é possível concluir que, para todas as condições de agitação ensaiadas:

- a rebentação na situação atual (sem QMD) ocorre a sotamar da posição de implantação prevista para o QMD, próxima da linha de costa;
- o QMD tem influência sobre as condições de rebentação, levando a que estas ocorram na zona próxima ou sobre o QMD;
- Relativamente à linha de rebentação observada nos ensaios, para as condições de agitação regular ensaiadas:
 - Para o caso sem QMD, a rebentação dá-se junto à linha de costa, afastando-se desta, mas mantendo sensivelmente o mesmo comprimento, com o aumento da altura de onda. A rebentação é do tipo progressivo, sendo adequada para a prática de surf;
 - Para o caso com QMD 0°, embora o comprimento da linha de rebentação seja com alguma dimensão, a rebentação não se dá de forma gradual, não sendo adequada para a prática do surf;
 - Para o caso com QMD 45° o comprimento da linha de rebentação é inferior ao do caso QMD 0°, mas a rebentação é do tipo mergulhante e ocorre de forma gradual sendo adequada para a prática de surf.

Da observação da posição e comprimento da linha de rebentação, assim como do tipo e forma de rebentação pode concluir-se que, dos casos ensaiados, no caso sem QMD e no caso com QMD 45° obtiveram-se condições de rebentação adequadas à prática de surf.

Agradecimentos

Os resultados do presente estudo decorrem do Programa coordenado pela APA e cofinanciado pelo Programa Operacional Sustentabilidade e Eficiência no Uso de Recursos, POSEUR -02-1809-FC-000039.



Referências Bibliográficas

- Mendonça, A., Fortes, C.J.E.M., Bicudo, P., Oliveira, F.S.B.F. (2021). “Estudo das condições de surfabilidade de um quebra-mar destacado na praia da Vagueira”. Atas do X Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa, 6 a 10 de dezembro de 2021.
- Oliveira, F.S.B.F., Sancho, F., Neves, M.G., Coelho, C., Pinheiro, L., Fortes, C.J.E.M., Teixeira, S., Pombo, R., Reis, M.T. (2020). “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à Praia da Vagueira; (T1) Estudos em modelo matemático: Alternativas de quebra-mar destacado para proteção contra galgamentos e erosão costeira – Relatório 8”. Relatório conjunto 231/2020 – DHA/LNEC.
- Sancho, F.; Neves, M.G.; Fortes, C.J.E.M.; Capitão, R. (2019). “Estudo de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T1) Estudos em modelo matemático: Memória descritiva – Relatório 4”. LNEC - Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2019 DHA/NEC.
- Sancho, F., Neves, M.G., Fortes, C.J.E.M., Silva, L.G. (2021). “Estudo de caracterização e viabilidade de um quebra-mar destacado multifuncional em frente à praia da Vagueira. (T2) Estudos em modelo físico reduzido: Estabelecimento do modelo físico – Relatório 12”. LNEC – Proc. 0604/121/21221. Relatório 408/2021 - DHA/NPE, LNEC.