



ESTUDO DE UM RECIFE ARTIFICIAL PARA A MELHORIA DAS CONDIÇÕES PARA A PRÁTICA DE SURF NA PRAIA DO CARNEIRO, PORTO

Tomás Calheiros-Cabral ^{a,b}; Victor Ramos ^{a,b}; Paulo Rosa-Santos ^{a,b}; Francisco Taveira-Pinto ^{a,b}; Hugo Guedes Lopes ^c

^a FEUP - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Civil, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal;

^b CIIMAR - Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental - Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões, Avenida General Norton de Matos, s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal;

^c Direção de Obras e Equipamentos, Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo SA, Avenida da Liberdade, 4451-851 Leça da Palmeira, Portugal

tcabral@fe.up.pt, jvrc@fe.up.pt, pjrsantos@fe.up.pt, fpinto@fe.up.pt, hugo.lopes@apdl.pt

Resumo

Neste trabalho é estudado um Recife Artificial para Surf (RAS) que visa a melhoria das condições para a prática de surf existentes na praia do Carneiro, Porto, Portugal, recorrendo à modelação compósita. O estudo avalia os principais parâmetros que determinam a qualidade das ondas para a prática de surf, nomeadamente, altura de onda, tipo e ângulo de rebentação da onda e magnitude das correntes. A estrutura foi concebida tendo em conta a batimetria e os afloramentos rochosos locais, assim como os níveis de maré e as condições de agitação marítima característicos do local. A zona em estudo foi reproduzida em modelo físico à escala 1/60 e o impacto do RAS nas condições para a prática de *surf* foi avaliado. De seguida, o modelo SWASH foi utilizado para modelar a zona de estudo e complementar o estudo em modelo físico. Os resultados mostram que o RAS melhora as condições para a prática de surf no local, embora a sua reorientação possa levar a uma melhoria mais significativa.

1. Introdução

O desporto *surf* tem crescido em popularidade desde a sua génese na Polinésia no século XII. No entanto, a sua prática depende do contexto local, como as condições de agitação marítima e a batimetria dos fundos. De modo a criar ou melhorar as condições para a prática de surf, podem ser construídas estruturas submersas, semelhantes a quebra-mares submersos, que alteram as condições locais e induzem a rebentação da onda de forma a que esta seja favorável à prática de *surf*, chamadas Recifes Artificiais para Surf (RAS). O presente trabalho descreve o estudo de um RAS para melhorar as condições para a prática de surf na Praia do Carneiro, Porto, Portugal. Inicialmente será descrito o processo de conceção e pré-dimensionamento do RAS, seguido do trabalho de modelação física realizado no tanque de ondas da Secção de Hidráulica e Recursos Hídricos da FEUP e os resultados dos testes. De seguida, será apresentado o estudo numérico complementar que foi realizado com o modelo SWASH. Finalmente, as principais conclusões do estudo realizado serão apresentadas de acordo com os resultados dos ensaios em modelo físico e numérico.

2. Conceção e pré-dimensionamento

2.1. Estado da arte

O dimensionamento do RAS para a praia do Carneiro foi realizado considerando a experiência e as lições aprendidas com os RAS previamente projetados e construídos, dos quais os seguintes merecem referência:

1. Cables, Perth, Austrália (1999);
2. Narrowneck, Queensland, Austrália (1999);
3. Pratte's Reef, Los Angeles, Califórnia (2000);
4. Mount Maunganui, Tauranga, Rotorua, Nova Zelândia (2005);
5. Opunake, Taranaki, Nova Zelândia;
6. Boscombe, Bournemouth, Inglaterra (2009);
7. Kovalam, Kovalam, Índia (2010);
8. Palm Beach, Gold Coast, Austrália (2019).

9. Albany, Albany, Austrália (2022).

As características destes RAS foram avaliadas, nomeadamente o volume e as dimensões, o objetivo (apenas de melhoria das condições para o surf ou também de proteção costeira), os resultados relativos à melhoria das condições para a prática de surf, o impacto ambiental e a integridade estrutural, e retiraram-se, entre outras, as seguintes conclusões:

- Os RAS construídos com sacos de geotêxtil cheios com areia apresentaram um mau desempenho em todos os casos analisados, devido à tendência para os sacos e/ou geocontentores se movimentarem, afundarem e falharem estruturalmente;
- Os RAS construídos com rocha aparentam maior sucesso devido à maior estabilidade estrutural;
- Os RAS aparentam ter maior sucesso em locais com uma menor amplitude de maré;
- Os RAS com uma forma de *boomerang* permitem criar condições adequadas para surf em duas direções, contrariamente aos RAS alinhados em apenas uma direção.

2.2. Parâmetros característicos das ondas adequadas para a prática de surf

A qualidade de uma onda para a prática de surf é um tópico subjetivo. No entanto, existem alguns parâmetros que permitem avaliar de forma simplificada a adequação da onda para a prática de surf:

- Altura de onda (significativa);
- Ângulo de rebentação da onda;
- Tipo de rebentação da onda;
- Intensidade das correntes.

Estes parâmetros serão avaliados no modelo físico e numérico (exceto a intensidade das correntes no modelo físico), recorrendo à observação dos ensaios, à análise dos vídeos e fotografias registados e aos resultados obtidos com o modelo numérico SWASH.

2.3. Soluções

Numa primeira fase, para o RAS da praia do Carneiro, foram definidas cinco soluções. Estas foram desenvolvidas em articulação com a comunidade surfista local e apresentadas à Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo, SA. Na sequência desse processo de consulta, foi tomada a decisão de estudar uma solução em forma de *boomerang*, com braços de cerca de 150 m de comprimento, um desenvolvimento total na direção paralela à linha de costa de cerca de 140 m, estando o ponto mais próximo da linha de costa a cerca de 15 m desta. Os braços têm uma orientação NE-SW (braço Norte) e N-S (braço sul), perfazendo um ângulo de 66° entre eles. A estrutura proposta tem o coroamento a cota baixa (+2.00 m ZH), talude a barlar suave (inclinação entre 1V:15H e 1V:7H) e talude a sotamar inclinado (inclinação entre 1V:2H e 1V:1.5H), sendo materializada através da colocação de enrocamento disposto de uma forma arrumada e com o peso necessário para garantir as necessárias condições de estabilidade da estrutura. A área de implantação é de cerca de 9 000 m² e o volume da estrutura foi estimado em cerca de 12 000 m³. A Figura 1 apresenta o RAS dimensionado, a sua implantação no local e a batimetria da zona em estudo.



Figura 1. Configuração do recife artificial (a), a sua implantação na praia do Carneiro (b) e (c) batimetria da área de estudo.

3. Modelação física

3.1. Construção e setup experimental

O modelo físico foi construído à escala geométrica 1/60. A zona em estudo abrangeu uma área correspondente a toda a linha de costa da referida praia e os fundos foram reproduzidos até à cota de -10.0 m ZH com o maior rigor possível, e até à cota de -13.0 m ZH de uma forma simplificada. A área de estudo aproximada é de 600x600 m². A estrutura a testar foi construída utilizando enrocamento com um peso volúmico médio de 26 kN/m³ e dimensão adequada às condições locais de agitação marítima a simular. A estrutura foi construída sobre uma camada base de enrocamento de forma a evitar possíveis assentamentos. Foram dispostas duas sondas de níveis hidrodinâmicos em frente às pás do sistema de geração e nove em volta da estrutura, de forma a registar a variação da superfície livre da água ao longo dos ensaios. Foram ainda utilizadas câmaras de filmar e fotografar de forma a registar a rebentação das ondas. A Figura 2 mostra o *setup* experimental e o modelo construído.

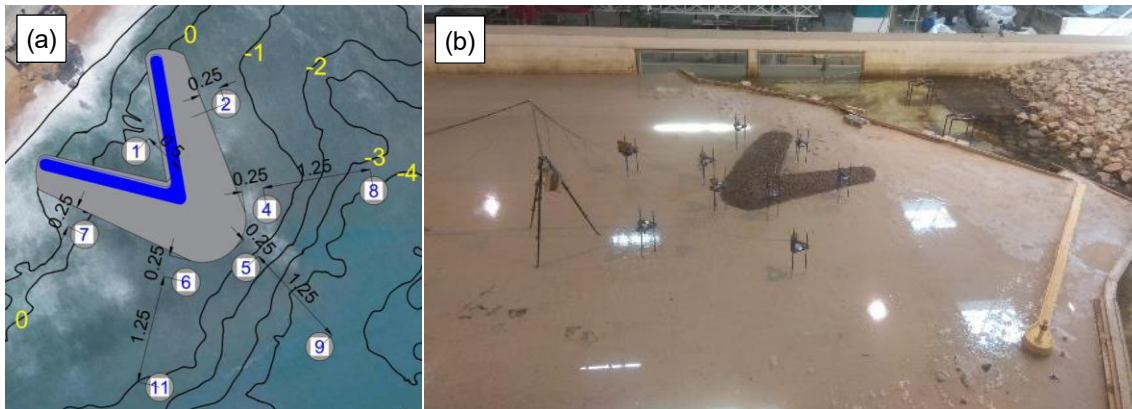


Figura 2. Implantação do modelo físico e localização das sondas de níveis hidrodinâmicos: (a) esquema e (b) fotografia do tanque de ondas (direita).

3.2. Casos de estudo

Foi realizado um conjunto de ensaios para cada cenário, sem e com a estrutura RAS a testar. A agitação marítima foi reproduzida nos ensaios de acordo com o espectro empírico JONSWAP, com um fator de forma $\gamma=3.3$. Foram considerados três níveis de água: Preia-mar (+3.5 m ZH), Nível Médio (+2.0 m ZH) e Baixa-mar (+0.5 m ZH), períodos de onda de pico, T_p , de 12 e 16 s, e alturas de onda significativas, H_{m0} , na fronteira do modelo físico, de 1, 2 e 3 m, Tabela 1. Os ensaios foram realizados para a direção WNW (mais frequente) na fronteira ao largo do modelo físico, ou seja, na batimétrica -10.0 m ZH.

3.3. Resultados

3.3.1. Distribuição espacial da altura de onda significativa

A altura de onda significativa obtida através duma análise espectral é apresentada para cada teste e para cada sonda de níveis hidrodinâmicos na Figura 3.

As duas sondas imediatamente à saída do sistema de geração registaram diferenças médias da altura de onda significativa inferiores a 2% entre as duas fases do estudo experimental, o que permite uma comparação realista entre os resultados com e sem a estrutura, pois as condições de agitação marítima incidentes são muito semelhantes.

As sondas S1, S5 e S11 sofreram falhas durante os testes 16, 1 e 7, respetivamente, e por isso esses resultados não são apresentados na Figura 3.



Tabela 1. Plano de testes (sem e com a estrutura).

Teste	Protótipo			Modelo físico (1/60)		
	Nível (ZH)	T_P (s)	H_{m0} (m)	Nível (ZH)	T_P (s)	H_{m0} (m)
1	BMAV (+0.50 m)	12	1	BMAV (+0.008 m)	1.55	0.017
2			2			0.033
3			3			0.050
4			1			0.017
5			2			0.033
6			3			0.050
7	NM (+2.00 m)	12	1	NM (+0.033 m)	1.55	0.017
8			2			0.033
9			3			0.050
10			1			0.017
11			2			0.033
12			3			0.050
13	PMAV (+3.50 m)	12	1	PMAV (+0.058 m)	1.55	0.017
14			2			0.033
15			3			0.050
16			1			0.017
17			2			0.033
18			3			0.050

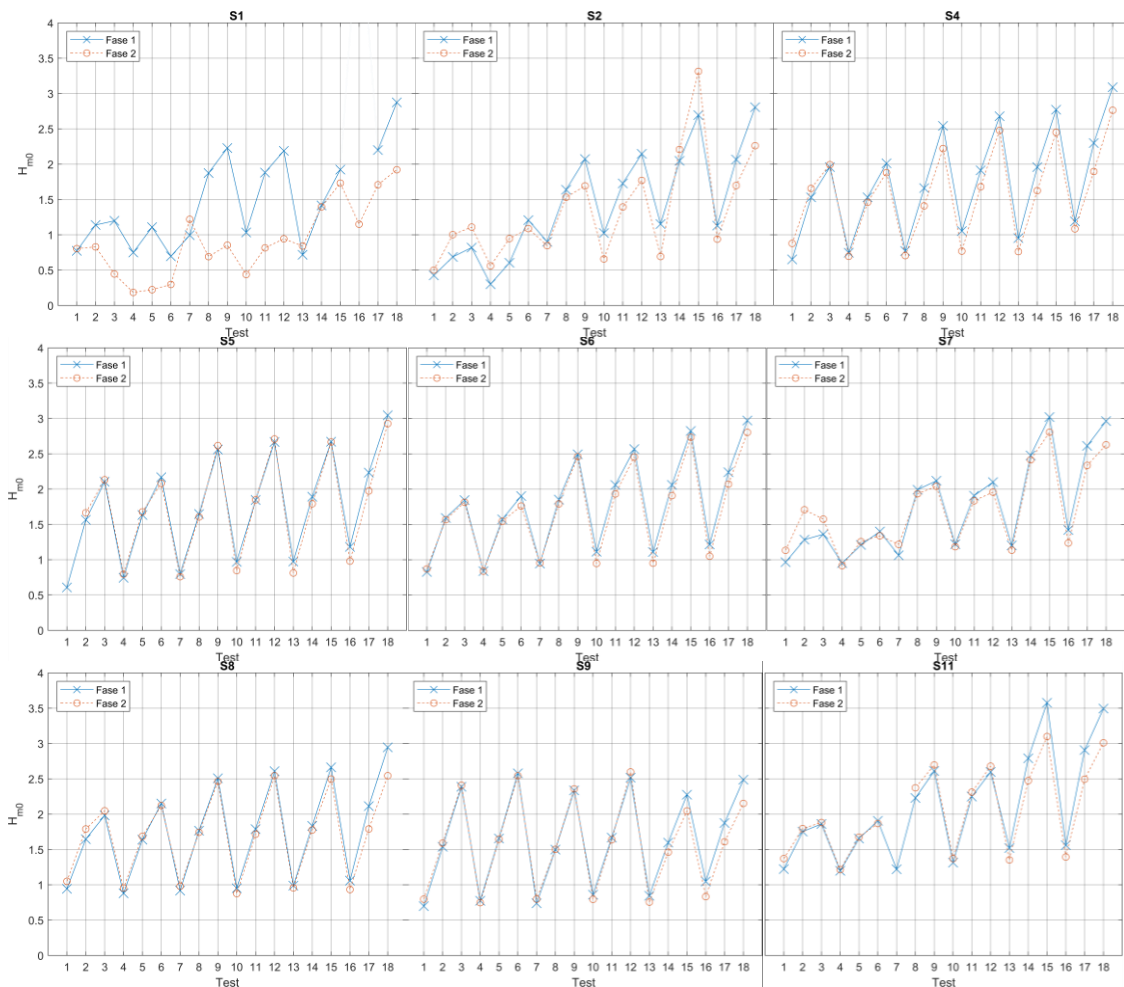


Figura 3. Altura de onda significativa espectral estimada com base nos registos das sondas nos 18 testes realizados.



As sondas S8, S9 e S11, colocadas a cerca de 1.5 m da estrutura do RAS (à esquerda, à direita e centrada em relação à estrutura, respetivamente, Figura 2), permitem avaliar a elevação da superfície livre da água um pouco antes da onda ser afetada pela estrutura. As alturas de onda significativa registadas pelas sondas S8, S9 e S11 não sofreram uma variação considerável entre os testes da Fase 1 e da Fase 2. Observam-se diferenças mais significativas nos testes com a PMAV, em que as alturas de onda significativa sofreram uma redução ligeira com a construção da estrutura, provavelmente devido à reflexão das ondas devido à construção da estrutura na Fase 2, assim como a ligeiras diferenças na reprodução da batimetria dos fundos no tanque de ondas entre a Fase 1 e a Fase 2.

As alturas de onda significativa estimadas para a posição da sonda S5 têm uma variação muito pouco considerável entre os testes da Fase 1 (sem estrutura) e da Fase 2 (com estrutura). Assim, considera-se que a onda que chega à estrutura é sensivelmente a mesma sem e com a estrutura, o que permite considerar que as diferenças entre a Fase 1 e a Fase 2 registadas pelas sondas próximas da estrutura são induzidas por esta.

Os valores de H_{mo} estimados para as sondas S2 e S4, colocadas perto do braço direito do RAS, não apresenta uma variação significativa com a introdução da estrutura (Fase 2). No entanto, a sonda S4 (colocada na fase inicial da rebentação da onda) mostra que há uma diminuição ligeira da altura da onda significativa na Fase 2 com a subida do nível de maré. A sonda S2 mostra que, para o nível de BMAV, o RAS conduziu a um aumento da altura de onda significativa, enquanto para os níveis médio e de PMAV, a estrutura conduziu a uma diminuição da altura de onda significativa.

A altura de onda significativa registada pelas sondas S6 e S7, colocadas perto do braço esquerdo do RAS, não apresenta uma variação significativa com a introdução da estrutura (Fase 2). No entanto, observa-se na sonda 7 a mesma tendência que na sonda 2: o aumento da altura de onda significativa para o nível de BMAV e uma ligeira diminuição para os níveis NM e de PMAV.

A sonda S1, colocada a sotamar da estrutura entre os dois braços do *boomerang*, regista a elevação da superfície livre próxima da batimétrica correspondente ao ZH (0,00 m). É perceptível que a altura de onda significativa para os níveis de BMAV e NM está limitada pela profundidade a cerca de 1.2 m e 2.2 m, respetivamente, e que a introdução do RAS levou a uma diminuição muito considerável da altura de onda significativa.

Conclui-se que a construção do RAS originou junto da estrutura, no geral, um aumento da altura de onda significativa para o nível de BMAV, teve um efeito reduzido para o NM, e levou a uma diminuição da altura de onda significativa para o nível de PMAV. A estrutura criou ainda uma zona protegida da agitação marítima entre os seus dois braços, que é propícia à utilização pelos banhistas.

3.3.2. Análise dos registos de vídeo e fotográficos

Todos os ensaios foram gravados com duas câmaras de filmar apontadas a cada braço do RAS, e uma câmara colocada acima e ortogonalmente a este. A Figura 4 mostra exemplos de capturas de ecrã destes registos.

A análise dos registos de vídeo dos testes permitiu elaborar a Tabela 2, onde são apresentadas as características das ondas que permitem caracterizar a sua qualidade para a prática de surf.

A observação dos registos de vídeo permitiu concluir que a estrutura aparenta ter um impacto positivo na qualidade da onda para a prática de surf, nomeadamente em termos de tipo e ângulo de rebentação. De acordo com o ábaco apresentado por Hutt *et al.* (2001), as ondas originadas pelo RAS na praia do Carneiro são adequadas para surfistas de nível 5/6 ou acima ("Surfistas capazes de executar manobras standard consecutivamente. Executam manobras avançadas pontualmente").

Finalmente, os resultados apontam para uma melhoria das condições para a prática de surf com a construção do RAS proposto. Considera-se que seria vantajoso rodar o braço esquerdo do RAS no sentido dos ponteiros do relógio, de forma a reduzir o ângulo de rebentação das ondas e permitir a prática de surf por praticantes de perícia mais reduzida. No entanto, estudos

adicionais são necessários.

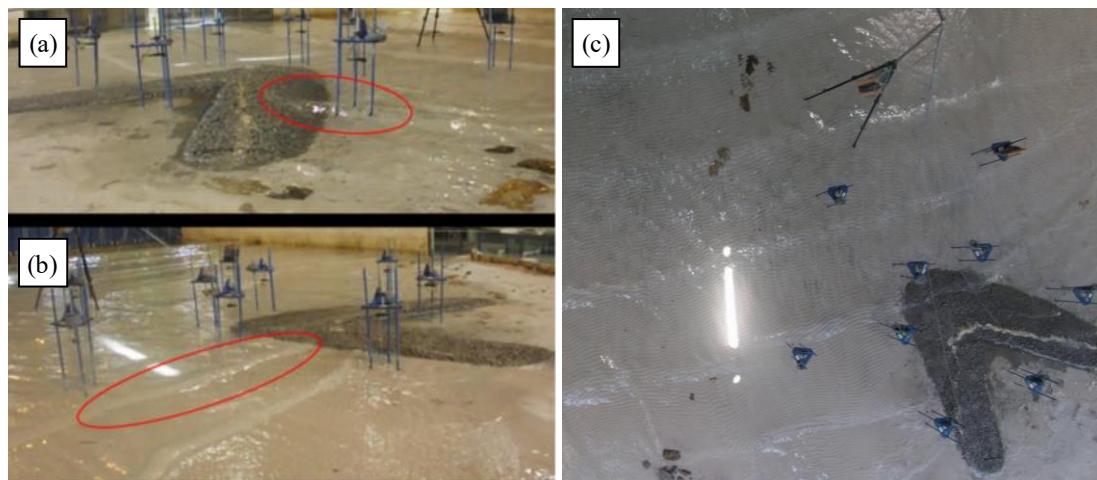


Figura 4. Registos de vídeo da onda a rebentar: (a) no braço esquerdo e (b) no braço direito do RAS, e da vista superior da estrutura (c).

Tabela 2. Características das ondas para cada teste das Fases 1 e 2.

Teste	Qualidade da onda para surf Fase 1	Qualidade da onda para surf Fase 2 (esq./dir.)	Ângulo de rebentação Fase 2 (esq./dir.)	Tipo de rebentação Fase 1	Tipo de rebentação Fase 2 (esq./dir.)	Tipo de rebentação Battjes (1974)
1	Muito baixa	Baixa/ Muito baixa	53°/90°	Oscilatória	Progressiva/ Oscilatória	Progressiva
2	Muito baixa	Aceitável/ Muito baixa	- / -	Colapsante	Progressiva/ Colapsante	Progressiva
3	Baixa	Muito alta/ Muito baixa	46°/93°	Colapsante	Mergulhante/ Colapsante	Progressiva
4	Muito baixa	Baixa/ Muito baixa	57°/90°	Oscilatória	Progressiva/ Oscilatória	Progressiva
5	Muito baixa	Aceitável/ Muito baixa	55°/93°	Colapsante	Progressiva/ Colapsante	Progressiva
6	Baixa	Muito alta/ Muito baixa	54°/90°	Colapsante	Mergulhante/ Colapsante	Progressiva
7	Muito baixa	Muito baixa/ Muito baixa	51°/90°	Oscilatória	Colapsante/ Oscilatória	Mergulhante
8	Muito baixa	Aceitável/ Muito baixa	44°/92°	Colapsante	Progressiva/ Colapsante	Progressiva
9	Baixa	Alta/ Muito baixa	44°/90°	Colapsante	Mergulhante/ Colapsante	Progressiva
10	Muito baixa	Muito baixa/ Muito baixa	48°/87°	Oscilatória	Colapsante/ Oscilatória	Mergulhante
11	Muito baixa	Aceitável/ Muito baixa	46°/89°	Colapsante	Progressiva/ Colapsante	Mergulhante
12	Baixa	Alta/ Muito baixa	47°/97°	Colapsante	Mergulhante/ Colapsante	Progressiva
13	Muito baixa	Muito baixa/ Muito baixa	48°/90°	Oscilatória	Colapsante/ Oscilatória	Mergulhante
14	Muito baixa	Baixa/ Muito baixa	41°/94°	Colapsante	Progressiva/ Colapsante	Mergulhante
15	Muito baixa	Aceitável/ Muito baixa	40°/95°	Colapsante	Mergulhante/ Colapsante	Progressiva
16	Muito baixa	Muito baixa/ Muito baixa	44°/88°	Oscilatória	Colapsante/ Oscilatória	Mergulhante
17	Muito baixa	Baixa/ Muito baixa	44°/85°	Colapsante	Progressiva/ Colapsante	Mergulhante
18	Muito baixa	Aceitável/Muito baixa	43°/89°	Colapsante	Mergulhante/ Colapsante	Progressiva



4. Modelação numérica

4.1. Introdução

Com o objetivo de avaliar com rigor as características da agitação marítima na zona envolvente ao RAS proposto, foi utilizado o modelo numérico *open-source* SWASH (Zijlema *et al.*, 2011). O SWASH é um modelo para a simulação da propagação de agitação marítima, multidimensional e não-hidrostático, que descreve fenómenos não estacionários, rotacionais e de transporte em zonas costeiras, causados pelas ondas, marés, impulsão e vento. Em relação à transformação das ondas na zona de rebentação, o SWASH demonstrou considerar com precisão os principais processos físicos, tais como o empolamento não linear, rebentação das ondas, espraiamento e correntes geradas pelas ondas (Smit *et al.*, 2013). Consequentemente, o SWASH foi considerado uma excelente ferramenta para o presente caso de estudo, considerando o equilíbrio entre a sua precisão e custo computacional.

4.2. SWASH - Modelo numérico não-hidrostático

O SWASH resolve as equações não lineares para águas pouco profundas, incluindo um termo para a pressão não-hidrostática. Essas equações são derivadas das equações de Navier-Stokes para um fluido incompressível, com massa volúmica constante e superfície livre. Por razões de simplicidade, as equações governantes são apresentadas para o plano vertical 2D em termos das coordenadas cartesianas x e z , e tempo t . Portanto, as equações de conservação de massa e da quantidade de movimento são, respetivamente:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial uu}{\partial x} + \frac{\partial wu}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial (p_h + p_{nh})}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial ww}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p_{nh}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} \quad (3)$$

onde g é a aceleração gravitacional, $u(x, z, t)$ e $w(x, z, t)$ as velocidades horizontal e vertical, respetivamente, ρ a massa volúmica da água, p_h e p_{nh} são os termos de pressão hidrostática e não hidrostática, respetivamente, e $\tau_{xx}, \tau_{xz}, \tau_{zz}, \tau_{zx}$ representam as tensões turbulentas.

A pressão hidrostática é expressa explicitamente em termos de nível de superfície livre (ζ) como:

$$p_h = \rho g (\zeta - z) \quad (4)$$

Portanto, a evolução temporal da elevação da superfície livre é obtida considerando o equilíbrio de massa (ou volume) para toda a coluna de água:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \int_{-d}^{\zeta} u dz = 0 \quad (5)$$

As equações de conservação de massa e da quantidade de movimento são resolvidas para condições fronteira cinemáticas e dinâmicas na superfície e no fundo. As condições fronteiras cinemáticas impõem que nenhuma partícula fluida deve deixar a superfície livre e que nenhuma partícula deve penetrar no fundo (fixo):

$$w = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} \quad \text{at } z = \zeta(x, t) \quad (6)$$

$$w = -u \frac{\partial d}{\partial x} \quad \text{at } z = -d(x) \quad (7)$$

A condição fronteira dinâmica na superfície livre traduz a existência de uma pressão constante



(pressão igual à pressão atmosférica, o que em termos de pressões efetivas se traduz em $p_h = p_{nh} = 0$) e ausência de tensão superficial.

Na fronteira externa aberta (i.e., sistema de geração de ondas), podem ser introduzidas ondas regulares ou irregulares especificando uma distribuição de velocidades local, u_b . Para evitar reflexões nesta fronteira, adota-se uma condição de baixa reflexão, permitindo a saída de ondas ao longo da fronteira (Blayo e Debreu, 2005):

$$u_b = \pm \sqrt{\frac{g}{h}} (2\zeta_b - \zeta) \quad (8)$$

onde u_b é a velocidade de entrada na fronteira e ζ_b o sinal da elevação da superfície livre das ondas incidentes.

Por fim, em relação à condição fronteira terrestre, o modelo SWASH apresenta duas abordagens diferentes. Por um lado, para o cálculo do espraiamento e do refluxo das ondas, é necessária a utilização de uma condição fronteira com a linha de costa móvel. Por outro lado, para os casos em que a fronteira terrestre está localizada na zona de pré-rebentação, uma condição absorvente pode ser imposta. Normalmente, é utilizada a condição de radiação de Sommerfeld, que permite que as ondas (longas) cruzem a fronteira de saída sem reflexões (Zijlema et al., 2011). Os limites fechados são considerados paredes sólidas e, portanto, são totalmente refletivos.

4.3. Implementação do modelo

Esta secção descreve as etapas mais relevantes da implementação do modelo SWASH para a área de estudo. A definição da batimetria da praia do Carneiro teve como base um levantamento comissionado pela APDL em 2018. Esse levantamento foi ainda complementado com dados batimétricos da *Sonar Navionics Nautical Chart*. Para além disso, um modelo CAD, à escala de protótipo, do RAS foi integrado no conjunto de dados batimétricos. Para isso, nas proximidades do RAS, a batimetria foi suavizada, com o objetivo de gerar uma transição suave e realista entre o fundo do mar e o RAS. A batimetria da área de estudo com o RAS incorporado é apresentada na Figura 1c.

O domínio computacional foi discretizado através de uma grelha regular uniforme. A resolução da grelha foi escolhida com base no comprimento de onda na fronteira de geração de ondas do domínio. Neste contexto, recomenda-se usar entre 50 e 100 células por comprimento de onda (SWASH, 2020). Assim, para o presente estudo, foi selecionada uma grelha com dimensões 2 x 2 m, de forma a permitir uma conveniente reprodução das complexas características batimétricas da área de estudo, que são especialmente relevantes para o RAS. Em relação à definição vertical da grelha computacional, foi utilizada uma única camada.

Nas simulações realizadas foi utilizado um arranque a frio (*cold-start*) para as condições iniciais do modelo (velocidade zero e nível de água espacialmente constante). As condições de agitação marítima foram geradas na fronteira oeste, assumindo uma forma espectral de JONSWAP com um parâmetro $\gamma = 3.3$, que é característico das condições de agitação da costa portuguesa. Para além disso, a fronteira oeste foi definida como sendo de baixa reflexão, de modo a que as ondas refletidas não influenciassem a geração de ondas. Os limites norte e sul foram definidos como fechados e, portanto, totalmente refletivos. Finalmente, a fronteira este foi definida como uma combinação de uma condição de radiação de Sommerfeld e uma camada esponja (*sponge layer*) para absorver as ondas que saem do domínio computacional. A rebentação da onda induzida pela profundidade de água foi modelada usando a *abordagem de frente hidrostática (hydrostatic front approach)*. A Figura 5 mostra o domínio computacional da área de estudo.

Neste estudo, foi utilizada uma integração explícita no domínio do tempo para todos os cálculos. Portanto, o passo de tempo é determinado automaticamente com base no número de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL), associado à velocidade de onda longa. O passo de tempo inicial utilizado para o presente estudo foi de 0,01 s, que é reduzido para metade quando este número se torna maior do que uma constante pré-estabelecida, $CFL_{high} < 0.3$, e duplicado quando este número é menor do que outra constante, $CFL_{low} > 0.05$, com a finalidade de garantir estabilidade

numérica (SWASH, 2020). Por fim, para o cálculo dos parâmetros estatísticos, como a altura de onda significativa espectral (H_{m0}), o período de simulação deve ser, no mínimo, de 15 a 20 min, o que corresponde a aproximadamente 100 ondas. Consequentemente, foi escolhido um período total de simulação de 40 min para todas as simulações, com períodos de *spin-up* e de análise de 10 e 30 min, respetivamente.

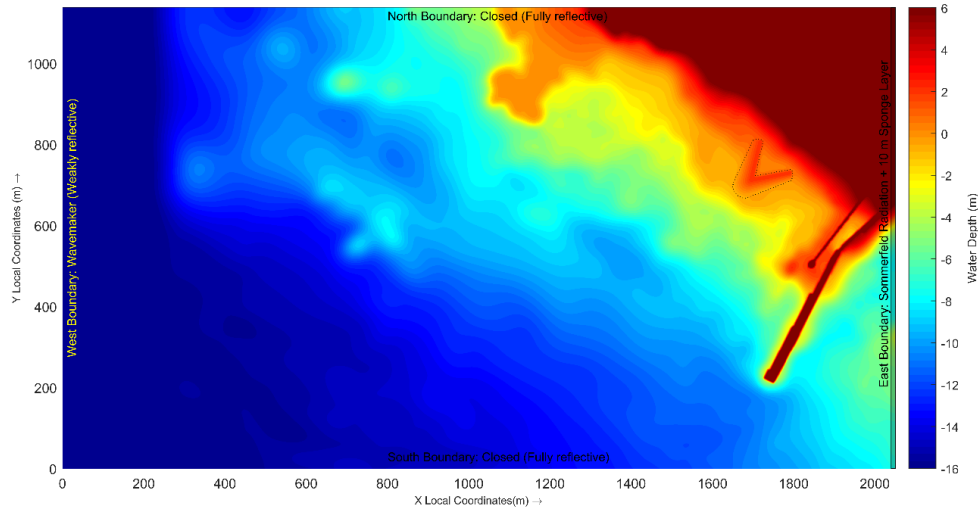


Figura 5. Domínio computacional da área de estudo.

4.4. Condições de teste

As condições de teste simuladas numericamente foram definidas tendo por base as condições de agitação marítima predominantes na área de estudo. Assim, neste contexto, os rumos mais frequentes concentram-se no quarto quadrante e, em particular, numa pequena faixa direcional de WNW a NW. Em contraste, as ocorrências nos dois primeiros quadrantes são negligenciáveis. Por outro lado, os estados de mar mais frequentes na área de estudo têm valores de H_s entre 1 e 4 m e T_p entre 10 e 16 s (Ramos *et al.*, 2020). Consequentemente, a avaliação numérica do desempenho do RAS foi realizada para a direção predominante (i.e., NW), três alturas de onda significativa (1, 2 e 3 m), dois períodos de pico (10 e 16 s) e três níveis de água (nível médio do mar, nível de baixa mar e nível de preia-mar). No total, foram analisados 18 casos de estudo.

4.5. Resultados

4.5.1. Modelação Numérica

Nesta secção, os resultados obtidos através da aplicação do modelo SWASH são utilizados para avaliar os principais parâmetros que influenciam a adequação das ondas para a prática de surf, designadamente a altura de onda, o tipo de rebentação das ondas e a magnitude das correntes.

4.5.2. Distribuição espacial da altura de onda significativa

A altura de onda é um dos principais indicadores usados para avaliar a adequação das ondas para a prática de surf. Em termos gerais, ondas com altura entre 0,5 a 10 m são adequadas para a prática de surf (Henriquez, 2004). Nesse sentido, esta subsecção apresenta a variação espacial das alturas de onda significativa (análise espectral) para a área de estudo. Vale a pena salientar que a altura de onda significativa foi calculada apenas nos últimos 30 minutos das simulações, tempo considerado suficiente para se estabelecerem condições estacionárias e, consequentemente, obter estatísticas fiáveis. Importa referir que, por questões de simplicidade, apenas são apresentados, nesta secção, os resultados obtidos para o nível médio do mar e para o estado de mar caracterizado por uma $H_s = 2$ m e um $T_p = 12$ s.

No geral, a distribuição espacial da altura de onda segue uma tendência comum para todos os

cenários analisados. Por um lado, as maiores alturas de onda significativa são encontradas a norte do RAS. Este facto pode ser explicado pelas menores profundidades de água devido à presença abundante de maciços rochosos na área. Como resultado, espera-se uma rebentação das ondas intensa nesta área. Além disso, pode-se observar que para períodos de onda maiores (16 s), a altura de onda significativa aumenta na extremidade do RAS. Por fim, para todos os casos analisados, a altura de onda significativa na proximidade do RAS varia aproximadamente entre 0,7 m e 2,5 m, o que segundo os critérios definidos por Henriquez, 2004 é adequado para a prática do surf.

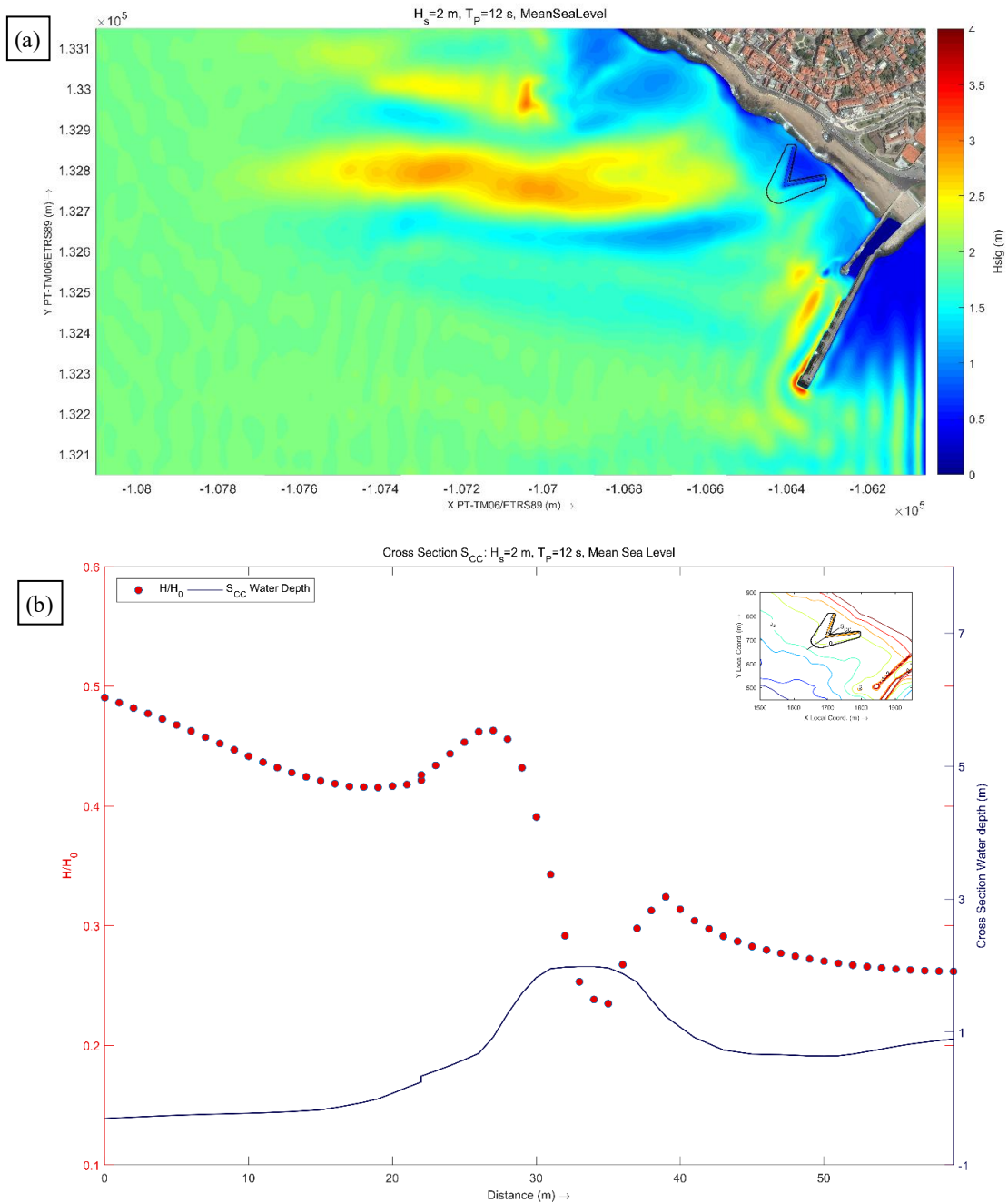


Figura 6. (a) Distribuição da altura de onda significativa e (b) Altura de onda relativa H/H_0 ao longo do perfil longitudinal da secção média do RAS. Condições de onda $H_s=2\text{ m}$, $T_p=12\text{ s}$ e nível médio do mar.



De forma a caracterizar com maior detalhe a evolução das ondas ao longo da estrutura do RAS, avaliou-se a variação da altura de onda significativa relativa, que corresponde ao quociente entre a altura de onda significativa propagada, H , e a altura de onda significativa imposta na fronteira geradora de ondas, H_0 . Portanto, a evolução de H/H_0 é representada para os perfis longitudinais da secção intermédia do RAS. Em todos os casos, a altura de onda relativa tende a diminuir ligeiramente até cerca de 10 m a barlar do RAS. A partir desse ponto, a altura relativa da onda aumenta significativamente devido ao efeito da rampa introduzida pelo RAS. Como resultado, a rebentação da onda ocorre na extremidade do RAS, reduzindo significativamente a altura de onda relativa. Vale a pena salientar que sem a rampa artificial gerada pelo RAS a altura de onda relativa poderia diminuir progressivamente, reduzindo a geração de ondas surfáveis. Por fim, a Figura 6b mostra a variação da altura de onda relativa (H/H_0) juntamente com a secção intermédia do RAS para o estado do mar de $H_s = 2\text{ m}$, $T_p = 12\text{ s}$ e condição de nível médio do mar.

4.5.3. Área e tipo de rebentação da onda

Como mencionado anteriormente, a rebentação da onda induzida pela profundidade de água desempenha um papel fundamental na determinação da adequação das ondas para a prática de surf. Por um lado, a extensão e localização da rebentação das ondas determinam a quantidade de espaço disponível para a prática do desporto. Por outro lado, o tipo de rebentação das ondas, que é determinada pelo número de Iribarren, é um dos fatores chave para avaliar a qualidade das ondas para surf. Globalmente, a rebentação das ondas concentra-se em quatro áreas principais: (i) junto do molhe de Felgueiras; (ii) ao longo da costa na praia do Carneiro; (iii) nos braços norte e sul do RAS; e (iv) maciços rochosos a norte do RAS. Como esperado, a área de rebentação das ondas aumenta para os estados de mar mais energéticos tornando-se mais homogénea ao longo da área de estudo. Além disso, estados de mar com períodos de onda maiores traduzem-se em áreas de rebentação das ondas maiores.

Em relação ao tipo de rebentação, que foi caracterizado através do número de Iribarren, foram encontradas diferentes situações. Para alturas de onda significativas de 1 m, ocorre rebentação do tipo mergulhante, considerado o mais apropriado para a prática do surf, no braço Sul do RAS e na praia do Carneiro. A norte do RAS (incluindo o seu braço norte), são encontradas ondas com rebentação progressiva. Conforme foi referido anteriormente, este tipo de rebentação é também considerado adequado para o surf, mesmo que resulte em ondas “suaves” ou “fracas” (Henriquez, 2004). Para o período de onda de 16 s, o número de Iribarren aumenta, resultando em ondas com rebentação colapsante (ou seja, não adequadas para o surf) na secção do braço sul do RAS mais próxima da costa.

Para alturas de onda significativa de 2 m, verificou-se uma tendência semelhante. As ondas com rebentação mergulhante concentram-se no braço sul do RAS e em frente à praia do Carneiro. A norte do RAS (incluindo o seu braço norte), são encontradas ondas com rebentação progressiva. Novamente, para o período de onda de 16s, o número de Iribarren aumenta. No entanto, neste caso, quase não são encontradas ondas com rebentação colapsante. Para alturas de onda significativa de 3 m, as ondas com rebentação do tipo progressiva são dominantes, com apenas uma secção do braço sul do RAS mais próxima da costa a apresentar ondas com rebentação mergulhante. Relativamente ao ângulo de rebentação, no braço norte do RAS, os valores são da ordem dos 90°, que não é o valor desejado para surfistas experientes (Henriquez, 2004). A sul do RAS, o ângulo de rebentação varia aproximadamente entre 45° e 60°. Esta gama de ângulos de rebentação é adequada para surfistas com experiência limitada a habilidade relativamente alta.

Em suma, considerando tanto o tipo como o ângulo de rebentação, a presença do RAS parece melhorar as condições para a prática de surf na sua secção sul. No entanto, os ângulos de rebentação gerados são mais adequados para surfistas qualificados e treinados do que para surfistas casuais. A Figura 7 mostra a área de rebentação das ondas e o número de Iribarren para o nível médio da água do mar e para o estado de mar caracterizado por uma $H_s = 2\text{ m}$ e um $T_p = 12\text{ s}$.

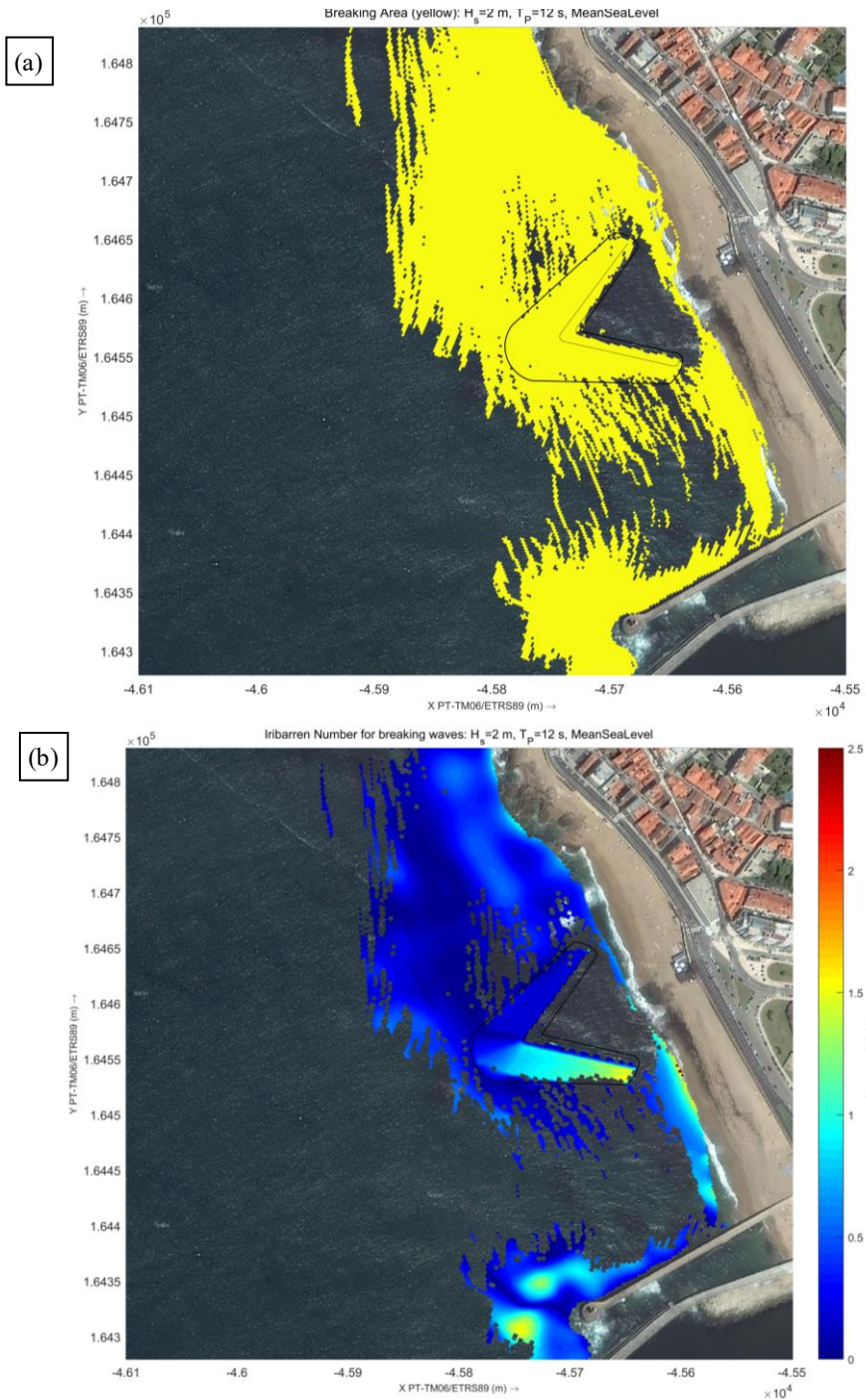


Figura 7. (a) Área de rebentação e (b) número de Iribarren para as condições de onda de $H_s=2$ m, $T_p=12$ s e nível médio do mar.

4.5.4. Distribuição espacial da corrente média

A velocidade da corrente também é um fator importante a ter em conta ao avaliar a qualidade das ondas para a prática de surf. Assim, foi calculada a distribuição espacial da velocidade média da corrente ponderada pela profundidade de água para os diferentes cenários analisados. No geral, as correntes seguem um padrão semelhante para todos os casos simulados. No braço norte do RAS encontram-se fortes correntes alinhadas paralelamente à costa e direcionadas para o RAS. Este facto pode ser explicado pela ocorrência de rebentação intensa nesta área

rochosa de pequena profundidade.

De referir que o escoamento direcionado para o RAS divide-se. Parte da corrente é canalizada através do espaço entre o RAS e a praia, enquanto a restante é direcionada ao longo do braço norte do RAS. Em ambos os casos, a corrente é acelerada atingindo valores entre 1,25 e 2,00 ms⁻¹. Por outro lado, junto ao molhe de Felgueiras, onde ocorre rebentação intensa das ondas, estão presentes correntes de elevada magnitude direcionadas para a costa. Como resultado, esta corrente junta-se com a gerada entre o RAS e a costa, resultando numa corrente em direção ao mar (corrente de retorno). No que diz respeito à adequação para a prática de surf, a direção média das correntes é oposta à direção das ondas, aumentando a sua declividade, resultando potencialmente numa rebentação de onda instável. A magnitude das correntes é relativamente alta (até 2,5 ms⁻¹), o que exige uma remada rápida dos surfistas (Henriquez 2004). Finalmente, a Figura 8 mostra a velocidade média das correntes ponderadas pela profundidade na área de estudo, para o estado do mar de $H_s = 2$ m, $T_p = 12$ s e condição de nível médio do mar.

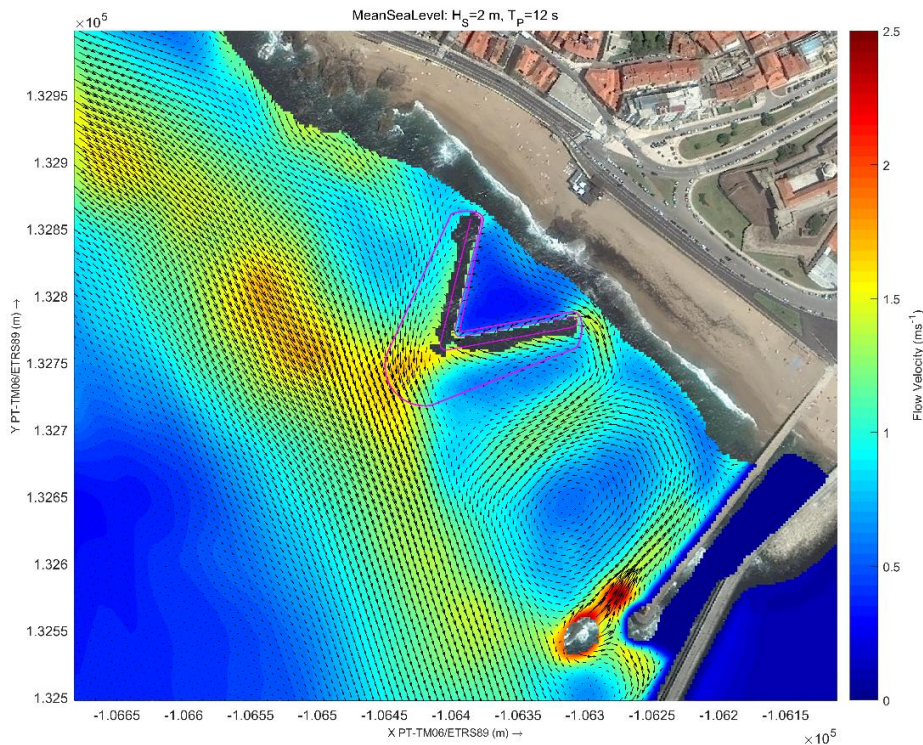


Figura 8. Velocidade média da corrente ponderada pela profundidade para as condições de onda de $H_s=2$ m, $T_p=12$ s e nível médio do mar.

5. Conclusões

Com base nos resultados obtidos a partir da modelação numérica, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- A presença do RAS aumenta a altura de onda relativa, o que resulta na rebentação da onda, que de outra forma ocorreria mais próximo da praia, aumentando a adequação das ondas para a prática de surf. No entanto, a rebentação das ondas no braço norte do RAS ocorre antes que estas atinjam o RAS (especialmente para as condições de nível baixo e médio do mar). Portanto, para essas condições, que são predominantes na área de estudo, no braço norte do RAS, os seus efeitos na rebentação das ondas podem ser considerados negligenciáveis.
- Em relação ao tipo de rebentação, o RAS tem geralmente um bom desempenho. No geral, duas tendências podem ser observadas. No braço norte do RAS, as ondas com



rebentação do tipo progressivo são dominantes. Pelo contrário, a sul do RAS são geradas ondas do tipo mergulhante, que são as preferidas pelos surfistas. Além disso, a variação do nível do mar influencia significativamente a rebentação das ondas. Para níveis do mar baixos, a área de rebentação das ondas reduz significativamente e resulta em ondas do tipo progressivo e colapsante no braço sul do RAS. Para níveis do mar altos, a área de rebentação das ondas aumenta. As ondas do tipo mergulhante são dominantes na secção sul do RAS e na costa da praia do Carneiro. Além disso, ondas do tipo colapsante, que não são adequadas para surf, também aparecem no braço norte.

- Os ângulos de rebentação das ondas apresentam valores que exigem surfistas experientes e com um certo grau de habilidade para fazer surf nas ondas.
- Em relação às correntes presentes na área, vale a pena ressaltar que a direção média das correntes não está alinhada com a direção das ondas, o que pode resultar em rebentação instável das ondas e, portanto, dificultar a prática de surf.

Com base nos resultados obtidos a partir da modelação física, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

- Os ângulos de rebentação das ondas esquerdas originadas pelo RAS estão dentro do intervalo pretendido; no entanto, grande parte das ondas direitas tem um ângulo de rebentação de 90°, originando um *closeout*;
- O tipo de rebentação da maioria das ondas é progressivo e mergulhante, ambos adequados à prática de surf;
- O nível de maré considerado tem um impacto significativo na qualidade das ondas para a prática de surf: o nível de maré baixa produz ondas com pouca qualidade para a prática de surf; com a subida da maré, a qualidade das ondas para a prática de surf aumenta;
- O RAS deveria rodar no sentido dos ponteiros do relógio de forma a originar ondas com ângulos de rebentação mais adequados à prática de surf por surfistas de perícia mais baixa.

Globalmente, o RAS melhora as condições atuais para a prática do surf na praia do Carneiro. No entanto, os resultados obtidos para os ângulos e tipo de rebentação da onda no braço norte do RAS não são adequados para a prática de surf. Nesse sentido, alinhar o RAS com a direção NW da onda pode melhorar os resultados, principalmente em termos do ângulo de rebentação. Esta medida deve ser corroborada por estudos adicionais.

Referências Bibliográficas

Hutt, J. A., Black, K. P. & Mead, S. T. (2001). "Classification of Surf Breaks in Relation to Surfing Skill", *Journal of Coastal Research*, pp. 66-81. ISSN: 07490208, 15515036.

Blayo, E., & Debreu, L. (2005). "Revisiting open boundary conditions from the point of view of characteristic variables", *Ocean modelling*, 9(3), 231-252.

Henriquez, M. (2004). "Artificial Surf Reefs". MSc Thesis, Delft University of Technology.

Ramos V., Cabral T., Rosa-Santos P., & Taveira-Pinto F. (2020). "Advanced and high-resolution numerical modelling of wave energy resource: Port of Leixões", Deliverable 5.5, PORTOS project.

Smit, P., Zijlema, M., and Stelling, G. (2013). "Depth-induced wave breaking in a nonhydrostatic, near-shore wave model", *Coastal Engineering*, 76, 1–16.

SWASH, 2020. "SWASH User Manual version 7.01", Delft University of Technology.

Zijlema, M., Stelling, G., and Smit, P. (2011). "SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters", *Coastal Engineering*, 58 (10), 992–1012.