

## **Desenvolvimento Experimental de uma Estratégia de Controle Morfodinâmico de Perfil de Praia Arenosa Dominada por Ondas**

### ***Experimental Development of a Morphodynamic Profile Control Strategy for Wave-Dominated Beaches***

Douglas Duarte Nemes<sup>1</sup>, Marcos Nicolás Gallo<sup>2</sup>, Francisco Pedocchi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CP 68508, bloco I, sala 100, Rio de Janeiro, [douglasnemes@oceanica.ufrj.br](mailto:douglasnemes@oceanica.ufrj.br)

<sup>2</sup> Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, CP 68508, bloco I, sala 100, Rio de Janeiro, [franciscofabian@oceanica.ufrj.br](mailto:franciscofabian@oceanica.ufrj.br)

<sup>3</sup> Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental. Montevideo, Uruguay; [kiko@fing.edu.uy](mailto:kiko@fing.edu.uy)

**RESUMO:** As estratégias de engenharia costeira para adaptação da população e suas atividades socioeconômicas ao redor dos oceanos é um tema que está em toda a história da civilização. Um dos desafios atuais é conter os processos erosivos no litoral, onde muitas cidades estão sentindo os efeitos do recuo da linha de costa. Para isto, as necessidades da sociedade moderna devem ser incluídas nos projetos de engenharia costeira, os quais devem ser desenvolvidos tendo em conta os conceitos naturais da dinâmica de cada sistema. O objetivo do presente estudo é demonstrar que um perfil arenoso, similar ao de praias do tipo intermediárias e que são vulneráveis ao processo erosivo, pode ser adaptado para se tornar um perfil predominantemente dissipativo, através da presença de um banco arenoso distal capaz de induzir a rebentação das ondas. No desenvolvimento desta estratégia foram utilizados os conceitos da morfodinâmica transversal de praias arenosas e o de estruturas costeiras submersas porosas. Para o efeito, uma estrutura porosa foi posicionada no antinó da oscilação hidrodinâmica longitudinal do sistema criado num canal de ondas. Com isso foi possível acumular sedimentos e ativar a formação de um banco arenoso distal. Esta forma morfológica passou a induzir a rebentação de ondas. Por sua vez, foi gerada uma larga e turbulenta zona de rebentação que passou a dissipar mais energia do que a 'natural'. Um sistema morfodinâmico dissipativo foi criado durante os testes com ondas de alta e baixa energia. A estratégia de utilizar uma estrutura submersa com alta porosidade tem a vantagem de se integrar no

processo morfodinâmico natural. Além disso, é uma estrutura leve em relação às tradicionais soluções de engenharia costeira, e que pode ser economicamente mais atrativa.

Palavras-chave: Engenharia Costeira; Estruturas Submersas Porosas; Bancos de Areia.

*ABSTRACT: Coastal engineering strategies to adapt population and their socioeconomic activities around the oceans is a theme that is constantly present in the history of civilization. One of the main current challenges is to contain erosive processes on the shore, where many cities are feeling the effects of the coastline retreat. For this reason, the needs of modern society must be included in coastal engineering projects, which should be developed taking into account the natural concepts of the dynamics of each system. This is the motivation of the present study, which aims to demonstrate that a sandy profile that is vulnerable to erosive processes can be managed to become a predominantly dissipative profile, by introducing a sandy bank able to induce wave breaking. For this strategy, concepts of transverse morphodynamics of sandy beaches and of submerged porous coastal structures were used. When the structure was placed in the location of the anti-node of the system's longitudinal hydrodynamic oscillation within a wave channel, it was possible to control the transport of sediments. The strategy was to accumulate the sediments inside the porous structure to replicate the shape of a distal sandy bank, which started to induce waves' breaking. In turn, a wide and turbulent breaking zone was generated able to dissipate more energy than the 'natural' breaking zone. A dissipative morphodynamic system was predominant during the high and low wave energy scenarios. The strategy of using a submersible structure with high porosity has the advantage of being integrated in the natural morphodynamic processes. In addition, this is a lightweight structure compared to the traditional coastal engineering solutions, and it can be economically more attractive.*

*Keywords: Coastal Engineering; Submerged Porous Breakwater; Sandbars.*

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento e aprimoramento de estratégias de engenharia costeira tornaram-se essenciais para controlar o problema crônico de erosão costeira, muito evidente nas cidades litorâneas. Os centros de pesquisas com foco em engenharia costeira vêm demonstrando a vulnerabilidade dos principais centros urbanos costeiros face às modificações climáticas globais de ventos, ondas e nível médio do mar (Neves e Muehe, 2008; Muehe, 2010).

Qualquer alteração da energia que atinge o sistema praiial causa a reorganização da morfodinâmica do sistema. O aporte de sedimentos da praia também está sendo afetado, principalmente pela existência de barragens nos rios (Yang, 2011). A consequência é o rebaixamento do nível topográfico da praia em relação ao nível médio da água do mar que, também está aumentando, colapsando a infraestrutura urbana da costa, além de gerar riscos à população e transtornos socioeconômicos (Short e Klein, 2016).

Quando o ciclo retroalimentado de praias arenosas é modificado ou interrompido, a variabilidade sazonal de erosão e acreção não é mais sustentável. O engordamento de praia é a principal estratégia da engenharia costeira para tentar controlar o processo erosivo/destrutivo dominante (Van Rijn, 2011). Este método envolve buscar uma jazida sedimentar compatível com a sedimentologia do sistema praiial, para além da logística de transporte

deste material (Medeiros et al., 2014). Muitas vezes, esta estratégia ainda necessita do acompanhamento de outra obra acoplada, por exemplo com esporões, quebra-mares, sacos geotêxtil e estruturas porosas (Benedet et al., 2016), para que uma eventual perda de sedimentos não torne a estratégia insustentável e ineficiente a médio-longo prazo (> 5 anos).

O objetivo do presente estudo é desenvolver uma estratégia para reter os sedimentos no sistema praiial, especificamente na zona de rebentação de ondas, a fim de estabelecer um processo dissipativo da energia das ondas e estabilizar a morfologia de um perfil vulnerável à erosão.

Para proteger a costa da ação de ondas, o processo de indução da rebentação o mais longe possível da face da praia é o mais eficiente para dissipar a energia das ondas. Uma extensa zona de rebentação torna o processo extremamente eficiente, garantido a estabilidade morfológica na face da praia e sustentando o ciclo retroalimentado de erosão e acreção, num ciclo de ondas extremas e de calmarias, respectivamente.

Para isto, o presente estudo apresenta o desenvolvimento de uma estratégia com uma estrutura submersa porosa através de testes controlados em um perfil arenoso construído em um canal de ondas. A capacidade de ativar a formação do banco distal e induzir a rebentação das ondas foi possível com a prática do conceito de trabalhar com a natureza (*working with nature*), utilizando o

conhecimento da hidrodinâmica gerada no sistema para construir o processo de dissipação da energia que atinge a praia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento da presente estratégia de engenharia costeira parte do princípio da organização morfológica transversal de praias arenosas, como resultado da granulometria (velocidade de sedimentação,  $w_s$ ) e do clima de ondas (altura,  $H_b$ , e período,  $T$ ) na zona de rebentação (Wright e Short, 1984). Em resultado disso, a primeira expressão do transporte de sedimentos transversal do sistema praias é observada nos bancos arenosos (Hoefel e Elgar, 2003), os quais são as principais formas morfológicas do sistema praias na dissipação da energia das ondas (Wright *et al.*, 1982).

A hidrodinâmica gerada pela presença de ondas sobre um perfil arenoso é a referência para o desenvolvimento de estratégias de engenharia costeira para a dissipação da energia das ondas. A quantidade de movimento e massa gerada pela incidência de ondas sobre um perfil arenoso causa um sistema oscilatório que permanece estacionário quando há interação entre o fluxo incidente e o refletido (Figura 1- Ilustração do posicionamento dos bancos no perfil arenoso e da oscilação da superfície livre da água após a interação entre a onda refletida e a onda incidente, apresentada por Bowen (1980), utilizando o valor de  $\beta = 0.0769$  (1:13) (A). Resultado da aplicação da equação 3, identificando o posicionamento teórico dos Antinós/Bancos e dos Nós/Cavas para diferentes períodos de onda (B).). Com efeito, cada onda que incide, rebenta e atinge a praia é refletida (com energia muito menor) no sentido contrário ao da incidência. A onda incidente e a onda refletida são ondas progressivas que se deslocam em sentidos contrários, dominando o balanço hidrodinâmico do sistema.

Cada uma das ondas ( $H/L$ , altura/comprimento de onda) reproduzidas no modelo vai definir uma oscilação estacionária singular ao longo do eixo longitudinal ( $x$ ) do canal. Isto pode ser representado matematicamente por uma função de Bessel de ordem zero (Bowen, 1980),

$$J_0(x) = 1 - [(x/2)^2/(1!)^2] + [(x/2)^4/(2!)^2] - [(x/2)^6/(3!)^2] + [(x/2)^8/(4!)^2] - [(x/2)^{10}/(5!)^2] + [(x/2)^{12}/(6!)^2] - [(x/2)^{14}/(7!)^2] \dots \quad (1)$$

onde a forma da interação entre as ondas é descrita por um potencial no eixo horizontal,

$$\Phi_x = J_0(4\chi)^{1/2} \quad (2)$$

em que  $\chi$  representa a distância adimensional transversal

de nós e antinós que cruzam o eixo  $X$ ,

$$\chi = \omega^2 X / g \tan\beta \quad (3)$$

em que  $\omega$  é a frequência angular desta oscilação estacionária ( $2\pi/T$ ) e  $\beta$  o ângulo que o perfil arenoso da praia faz com a horizontal. Os valores adimensionais de  $\chi$  já são conhecidos (Short, 1999) para cada nó (1.4, 6.6, 17.6, 33.8, 54.8) e antinó (3.5, 12.3, 25.8, 44.5, 67.8) formado ao longo do eixo dos (Figura 1- Ilustração do posicionamento dos bancos no perfil arenoso e da oscilação da superfície livre da água após a interação entre a onda refletida e a onda incidente, apresentada por Bowen (1980), utilizando o valor de  $\beta = 0.0769$  (1:13) (A). Resultado da aplicação da equação 3, identificando o posicionamento teórico dos Antinós/Bancos e dos Nós/Cavas para diferentes períodos de onda (B).). Short (1999) explica que o resultado da convergência e divergência do fluxo hidrodinâmico da coluna d'água oscilante de maneira estacionária gera convergência e divergência no transporte de sedimentos. Isto permite identificar o posicionamento das formas morfológicas de bancos e cavas no sistema, através dos consecutivos nós/antinós formados no eixo longitudinal (Figura 1- Ilustração do posicionamento dos bancos no perfil arenoso e da oscilação da superfície livre da água após a interação entre a onda refletida e a onda incidente, apresentada por Bowen (1980), utilizando o valor de  $\beta = 0.0769$  (1:13) (A). Resultado da aplicação da equação 3, identificando o posicionamento teórico dos Antinós/Bancos e dos Nós/Cavas para diferentes períodos de onda (B).), respectivamente,

$$X_n = (g \chi \tan\beta) / (\omega^2) \quad (4)$$

Esta é uma expressão que sugere o posicionamento longitudinal dos bancos arenosos e da cava (Bowen, 1980), para várias ondas incidentes. No presente estudo foi utilizada esta formulação teórica para examinar a formação de duas formas básicas de perfil de equilíbrio (Figura 2 - Apresentação dos dois tipos de perfil de equilíbrio básicos que são criados num canal de ondas, sugeridos por Gourlay (1980), onde  $Z_c$  é a altura da Crista da Berma ou do Sopé da Duna em relação ao nível de água no canal,  $N_m$  é o nível médio na presença de ondas,  $X_d$  é a distância do Sopé da Duna modificado pelas ondas na face da praia até ao Banco Distal que induz a rebentação da onda, e  $H_b$  é a altura da onda na rebentação.) em canais de ondas (Gourlay, 1980): a) Perfil Refletivo; b) Perfil dissipativo.

Na Figura 2 - Apresentação dos dois tipos de perfil de equilíbrio básicos que são criados num canal de ondas, sugeridos por Gourlay (1980), onde  $Z_c$  é a altura da

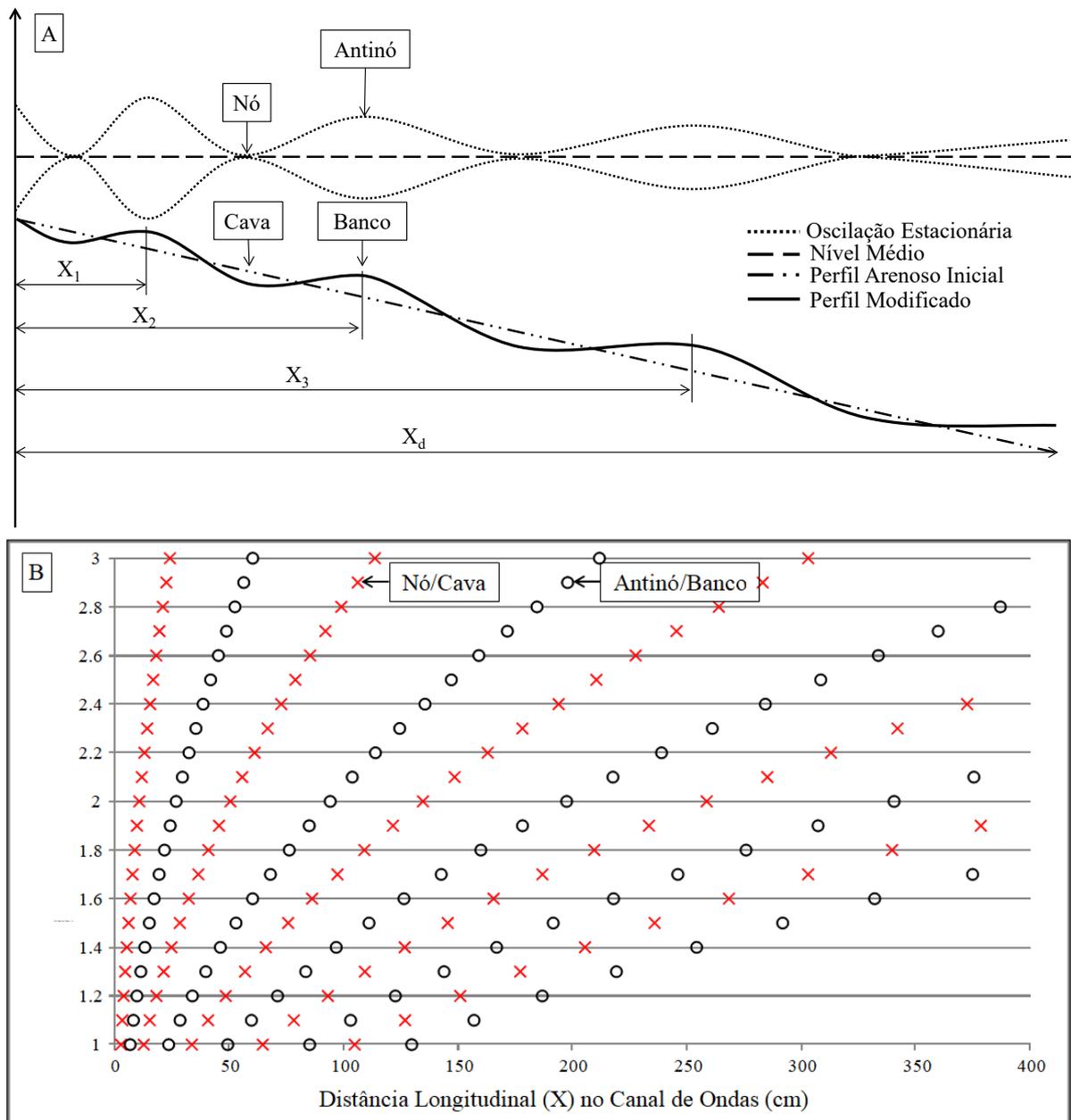


Figura 1- Ilustração do posicionamento dos bancos no perfil arenoso e da oscilação da superfície livre da água após a interação entre a onda refletida e a onda incidente, apresentada por Bowen (1980), utilizando o valor de  $\beta = 0.0769$  (1:13) (A). Resultado da aplicação da equação 3, identificando o posicionamento teórico dos Antinós/Bancos e dos Nós/Cavas para diferentes períodos de onda (B).

Figure 1- Illustration of the sandbars positioning at the beach profile and of the water free surface oscillation after the interaction between the reflected and the incident waves, presented by Bowen (1980), using the value of  $\beta = 0.0769$  (1 : 13) (A). Results of equation 3, identifying the theoretical positioning of Antinodes/Bars and Nodes/Trough for different wave periods (B).

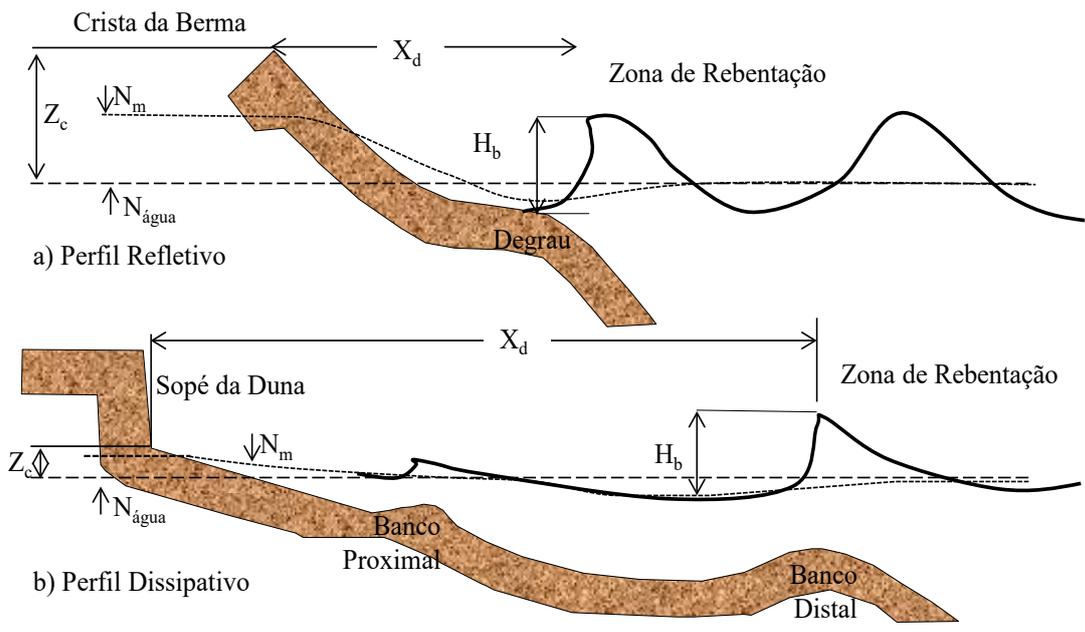


Figura 2 - Apresentação dos dois tipos de perfil de equilíbrio básicos que são criados num canal de ondas, sugeridos por Gourlay (1980), onde  $Z_c$  é a altura da Crista da Berma ou do Sopé da Duna em relação ao nível de água no canal,  $N_{água}$ ,  $N_m$  é o nível médio na presença de ondas,  $X_d$  é a distância do Sopé da Duna modificado pelas ondas na face da praia até ao Banco Distal que induz a rebentação da onda, e  $H_b$  é a altura da onda na rebentação.

Figure 2 - Presentation of the two basic types of equilibrium profiles that are created in a wave channel, suggested by Gourlay (1980), where  $Z_c$  is the height of Berm Crest or Dune in relation to the Water Level in the channel,  $N_{water}$ ,  $N_m$  is the average level in the presence of waves,  $X_d$  is the distance from the Dune toe modified by the waves to the Distal sand bar that induces the wave breaking and  $H_b$  is the wave height in the surf zone.

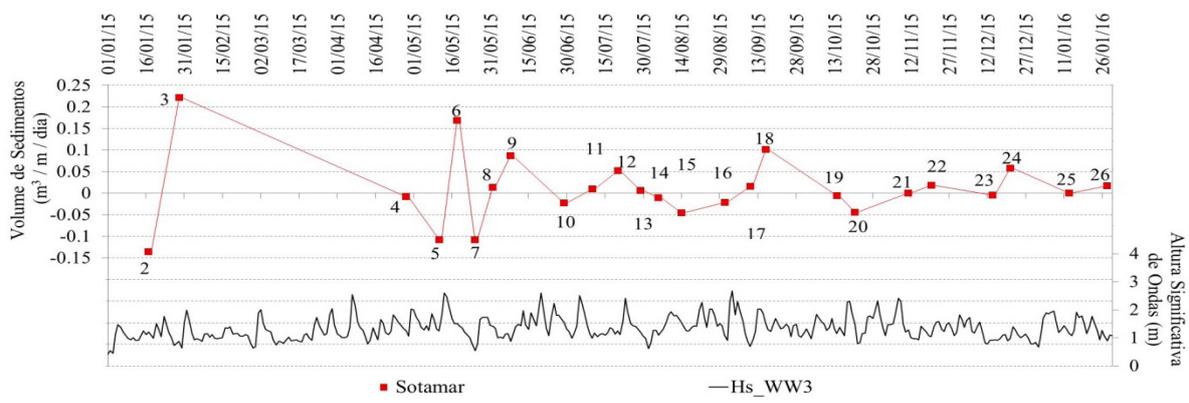


Figura 3 - Mobilidade da Praia da Reserva, litoral do Rio de Janeiro (Brasil), de acordo com as ondas que atingiram a praia ao longo de 2015.

Figure 3 - Mobility of the Reserve Beach at the coast of Rio de Janeiro (Brazil) according to the waves that reached the beach during the year 2015.

Crista da Berma ou do Sopé da Duna em relação ao nível de água no canal,  $N_{\text{água}}$ ,  $N_m$  é o nível médio na presença de ondas,  $X_d$  é a distância do Sopé da Duna modificado pelas ondas na face da praia até ao Banco Distal que induz a rebentação da onda, e  $H_b$  é a altura da onda na rebentação. é possível perceber que no perfil refletivo (a) a energia da onda será dissipada na zona de espriamento, enquanto no perfil dissipativo (b) o banco distal induzirá a rebentação da onda e os processos de dissipação ocorrerão na zona de rebentação. O modo de formação destes perfis de equilíbrio será representado num canal de ondas com fundo móvel, cujo desafio foi ativar a formação morfológica de perfis dissipativos com ondas incidentes de diferentes características.

## 2.1 Modelo Físico de Fundo Móvel

Os ensaios em modelo físico foram conduzidos no Laboratório de Mecânica dos Fluidos e Engenharia Ambiental da Universidade de La República, Uruguai. Foi utilizado um canal de ondas de 18.5 m de comprimento, 0.51 m de largura e 0.7 m de altura com paredes laterais de vidro. Um batedor elétrico do tipo pistão gerou ondas monocromáticas, sendo a profundidade de água igual a 0.3 m, sem variação de nível.

A escala geometrica ( $e$ ) utilizada foi de 1/20, respeitando a semelhança de Froude existente entre as dimensões de comprimento ( $e_L$ ) e tempo ( $e_T$ ). Conservando o número de Froude, obtém-se a relação entre a escala das velocidades ( $e_U$ ), dos comprimentos ( $e_L$ ) e do tempo ( $e_T$ ),

$$e_L = e_T^2 \quad (5)$$

A referência para definir as características das ondas e do perfil morfológico ( $d_{50}$  0.300mm – 0.500mm) foi o estudo de Nemes (2016). O autor analisou a mobilidade da praia da Reserva (Figura 3 - Mobilidade da Praia da Reserva, litoral do Rio de Janeiro (Brasil), de acordo com as ondas que atingiram a praia ao longo de 2015.), litoral do Rio de Janeiro (Brasil), em resposta à presença

de um afloramento rochoso na zona de rebentação de ondas. Esta é uma praia oceânica do tipo intermediária, governada pela elevada energia de ondas incidentes (alturas de onda significativas e períodos de onda entre 0.5 m e 2.7 m e 4 s e 18 s, respectivamente, e alturas de onda máximas de 4.5 m) com regime de micro maré (1.2 m). Este tipo de praia foi escolhido pois, segundo Wright e Short (1984), são as mais comuns no planeta. Além disso, a presença de uma estrutura rochosa na zona de rebentação das ondas é coincidente com a formação do banco arenoso da praia da Reserva (Nemes, 2016). Mesmo evoluindo morfológicamente para estados refletivos, neste setor da praia, existe acumulação de sedimentos no banco rochoso que a caracteriza como dissipativa, a partir da rebentação das ondas neste local.

No canal de ondas, os parâmetros altura de onda ( $H$ ) e período de onda ( $T$ ) foram aferidos na parede lateral de vidro, com medições de tempo e espaço, respectivamente com cronómetro e régua graduada. As medições foram realizadas a 4 m do gerador de ondas, onde também foi posicionado o instrumento acústico *Ultra Velocimeter Profiler* (UVP). O UVP registra a velocidade das partículas na coluna de água ao longo de um feixe acústico de 1.0 m, compreendendo 325 células de medição. Este equipamento foi instalado a 0.15 m do fundo do canal, com o feixe acústico na direção do batedor de ondas a uma distância de 4 m (Figura 4 - Esquema ilustrativo das dimensões do canal de ondas e a condição de contorno do fundo inicial do talude com um declive de 1:13.). O sensor UVP foi utilizado para controlar as harmônicas presentes no canal e, no mesmo local, a altura ( $H_0$ ) e período ( $T$ ) da onda foram conferidos com uma régua e cronómetro, respectivamente

Os dados do UVP foram utilizados para identificar a presença de sub-harmônicas nos testes realizados para as várias condições de agitação, tendo sido validados apenas os testes com influência da harmônica principal gerada pelo batedor de ondas. Para realizar a decomposição das harmônicas de ondas registradas no canal foram

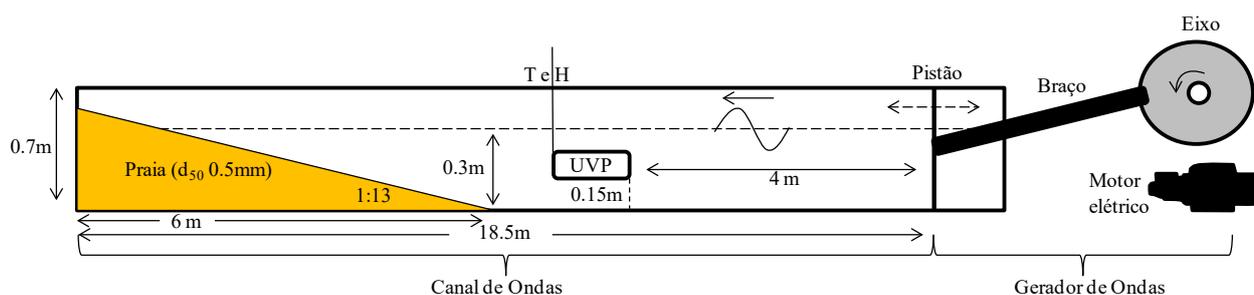


Figura 4 - Esquema ilustrativo das dimensões do canal de ondas e a condição de contorno do fundo inicial do talude com um declive de 1:13.

Figure 4 - Illustration of the wave channel dimensions and the contour condition of the initial bottom slope with an inclination of 1:13.

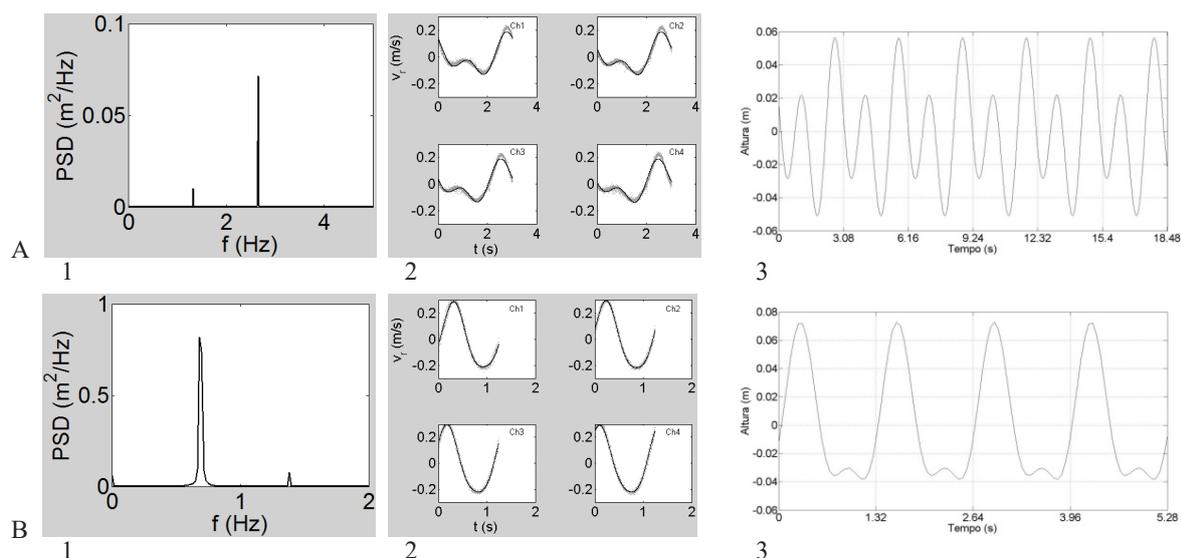


Figura 5 - Resultados do registro de velocidades horizontais com um UVP para duas ondas diferentes (A e B): (1) densidade espectral de velocidades geradas pelas ondas; (2) reconstrução do perfil de velocidades horizontais e; (3) decomposição harmônica das ondas geradas no canal.

Figure 5 - Results of horizontal velocities recorded with a UVP for two different waves (A and B): (1) spectral density of velocities generated by the waves; (2) reconstruction of the horizontal velocity profile and; (3) harmonic decomposition of the waves generated in the channel.

utilizadas quatro células com medições de velocidade de correntes e aplicado o método de Mosquera e Pedocchi, (2013). A Figura 5 apresenta dois resultados (A e B) da aplicação dessa metodologia, onde a partir do espectro de velocidade (1) foi reconstituído o perfil de velocidades (2) e a superfície livre (3) no canal. Desse modo, o sistema construído fica totalmente controlado de forma a melhor representar a evolução morfológica com a hidrodinâmica longitudinal gerada pelo harmônico principal de cada teste (Figura 5).

O fundo móvel foi construído com areia ( $2.650 \text{ kg/m}^3$ ) de granulometria,  $d_{50}$ , 0.500 mm e inclinação de 1:13 (Figura 4 - Esquema ilustrativo das dimensões do canal de ondas e a condição de contorno do fundo inicial do talude com um declive de 1:13.). Para definir esta condição inicial foram tidos em consideração os trabalhos que avaliam as distorções de escalas em modelos de fundo móvel (Heller, 2011; Ranieri, 2007), além de experiências realizadas antes do presente estudo, a fim de reproduzir da melhor maneira as formas morfológicas de praias intermediárias: bancos, cavas e berma (Figura 2 - Apresentação dos dois tipos de perfil de equilíbrio básicos que são criados num canal de ondas, sugeridos por Gourlay (1980), onde  $Z_c$  é a altura da Crista da Berma ou do Sopé da Duna em relação ao nível de água no canal,  $N_{\text{água}}$ ,  $N_m$  é o nível médio na presença de ondas,  $X_d$  é a distância do Sopé da Duna modificado pelas ondas na face da praia até ao Banco Distal que induz a rebentação da onda, e  $H_b$  é a altura da onda na rebentação.). Segundo Van Rijn *et al.*

(2011), o mais relevante é a representação adequada dos volumes de erosão da praia e da duna em relação à praia protótipo. Estas referências foram apresentadas na Figura 3 - Mobilidade da Praia da Reserva, litoral do Rio de Janeiro (Brasil), de acordo com as ondas que atingiram a praia ao longo de 2015., descrevendo a mobilidade da Praia da Reserva (Nemes, 2016). Apesar da longa tradição da modelação física, importa destacar que os efeitos de escala gerados em modelos físicos costeiros ainda são um problema que não está completamente resolvido (Ranieri, 2007). Não existe um estudo onde todos os parâmetros relevantes tivessem sido escalonados para o modelo físico (Heller, 2011). Dessa forma, a semelhança dos processos de acreção ou erosão de praia não é incluída automaticamente na escala de Froude, mesmo que o material no modelo satisfaça a semelhança das condições de arraste (Motta, 1985). Por isso, a utilização de areia de granulometria similar em canais de ondas parece ser mais realística nos processos que envolvem a zona de rebentação e espraiamento, onde o fluxo é unidirecional e os parâmetros das ondas podem ser ajustados para o tipo de resposta morfológica desejada (Paul *et al.*, 1972; Heller, 2011). A principal vantagem é a similaridade das formas morfológicas de equilíbrio (Noda, 1978) que são controladas pelo ângulo de repouso do sedimento, viabilizando o propósito dos testes (Paul *et al.*, 1972) e a sua interpretação. Já a utilização de materiais mais leves resulta em acelerações inferiores das partículas no modelo e, conseqüentemente,

em taxas de transporte superiores e na criação de zonas de acumulação de partículas (Kamphuis e Nairn, 1984). A utilização de areia similar à referência tem sido utilizada em diversos estudos (Cheng *et al.*, 2016, 0.15 mm; Alsina *et al.*, 2012, 0.250 mm; Ranasinghe *et al.*, 2006, 0.25 mm; Wang *et al.*, 2002, 0.150 mm; Smith *et al.*, 2003, 0.150 mm; Noda, 1978). Embora também sejam utilizados materiais de fundo mais leves (Neves *et al.*, 2015, silicato de gravidade específica 1.55, 0.273 mm; Turner *et al.*, 2001, PVC 0.4 mm e  $1.33 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ), eles não são mais utilizados para representar processos que ocorrem na zona de rebentação das ondas (Kamphuis, 1985).

Cada tipo de onda possui uma assimetria característica (Drake e Calantoni, 2001; Hoefel e Elgar, 2003; Nielsen, 2006) que, por sua vez, define um fator de fricção no fundo e uma tensão resultante que determina o transporte de sedimentos (Nielsen, 1992; Van Rijn, 1993). É por isso que perfis arenosos são agrupados em função do tipo de onda (Gourlay, 1980), definindo formas morfológicas de equilíbrio básico que respeitam o ângulo de repouso do sedimento.

Os perfis de equilíbrio morfológico foram definidos quando a mobilidade das feições de bancos e cavas foram menores do que 5% em relação ao início do teste. Este monitoramento foi realizado através de marcações com um marcador no vidro lateral do canal de ondas. O teste foi interrompido quando o transporte de sedimentos passou a ser insignificante (Motta, 1985; Wang e Kraus, 2005), ou seja, as formas morfológicas permaneceram em equilíbrio dinâmico.

Mesmo que Gourlay (1980) e outros autores (Grasso *et al.*, 2009) tenham demonstrado que a configuração inicial de um perfil arenoso não afeta o perfil de equilíbrio final, no presente estudo foram utilizados os resultados de perfis de equilíbrio de diferentes ondas para serem modificados posteriormente por ondas com outras características. Estes testes foram designados de 'Perfil Herdado'.

A mobilidade temporal e espacial do perfil em cada teste foi registrado com uma câmera de vídeo modelo Sony CyberShort de 24 Megapixels, posicionada lateralmente na parede de vidro do canal. Com as imagens referenciadas espacialmente  $f(x,z)$  em cada teste, os contornos dos perfis de equilíbrio foram obtidas no software de sistema de informações espaciais ArcGis10.1. Com esta informação, foi calculado o volume de sedimentos mobilizado no modelo, utilizando a área limitada pelo contorno das formas (altura), comprimento do perfil arenoso ou da forma e a largura do canal (0.5 m).

## 2.2 Estrutura Submersa Porosa

Nos últimos anos os estudos com estruturas submersas

porosas (Figura 6), *submerged porous breakwater* - SPBW, têm aumentado com o objetivo de atenuar a energia das ondas (Losada *et al.*, 1996; Pilarczyk, 2003; Ting *et al.*, 2004; Kobayashi *et al.*, 2007; Nishihata *et al.*, 2012; Wu e Hsiao, 2013; Akbari e Namin, 2013; Wu *et al.*, 2014; Metallinos *et al.*, 2016), bem como para reduzir a perda de sedimentos de uma alimentação de praia (Benedet *et al.*, 2016), por exemplo. Porém, a resposta do sistema sedimentar à presença da estrutura é negligenciada por todos. Vários estudos realizados com SPBW (Losada *et al.*, 1996; Pilarczyk, 2003; Ting *et al.*, 2004; Kobayashi *et al.*, 2007; Nishihata *et al.*, 2012; Wu e Hsiao, 2013; Akbari e Namin, 2013; Wu *et al.*, 2014; Metallinos *et al.*, 2016) descrevem usualmente o índice de reflexão e transmissão da onda, referindo também a ocorrência de uma dissipação de até 25% da energia da onda, no interior e no exterior do SPBW (Wu *et al.*, 2014).

Um interessante estudo hidrodinâmico tridimensional com uma onda solitária, simulada por Wu *et al.* (2014), mostra as partículas fluidas passando pelos poros e criando vórtices ao seu redor. Os autores puderam perceber que algumas partículas foram depositadas na retaguarda da estrutura e outras transportadas em sentido contrário ao de propagação da onda. Além disso, algumas partículas não saíram do SPBW, ocorrendo acumulação no seu interior. Wu *et al.* (2014) inferem que isto pode ser um problema para a utilização na costa, pois se a partícula fosse um sedimento iria alterar a porosidade da estrutura e a eficiência na dissipação da energia da onda. Por outro lado, se ocorre a acumulação no seu interior de partículas finas, como sedimentos, isto pode ser acoplado à dinâmica do sistema praiar e interagir com os processos físicos, a fim de construir um banco imerso e passar a induzir a rebentação da onda. Mas isso depende da natureza do transporte turbulento na zona de rebentação, que depende de cada tipo de onda (Ting e Kirby, 1994). O principal objetivo foi desenvolver um SPBW capaz de se acoplar à hidrodinâmica de um perfil arenoso dominado por ondas, a fim de acumular sedimentos no seu interior e gerar uma zona de rebentação de ondas.

Neste estudo foi construída uma estrutura porosa para ficar submersa no perfil arenoso (SPBW). A forma e dimensões foram baseadas nas barras imersas formadas pelos testes de 'Perfil Inicial' e de 'Perfil Herdado'. Para isto, foi construída uma estrutura trapezoidal da seguinte forma (Figura 7 A, B): foram utilizadas quatro barras de metal com 0.01 m de diâmetro para formar uma base de 0.6 m x 0.5 m. Outras quatro barras com comprimentos de 0.13 m e diâmetro de 0.004 m foram usadas para estabelecer a altura da estrutura submersa. Não foi usada nenhuma estrutura rígida para fixar a base menor do trapézio (0.25 m, Figura 7 C). Esta armação

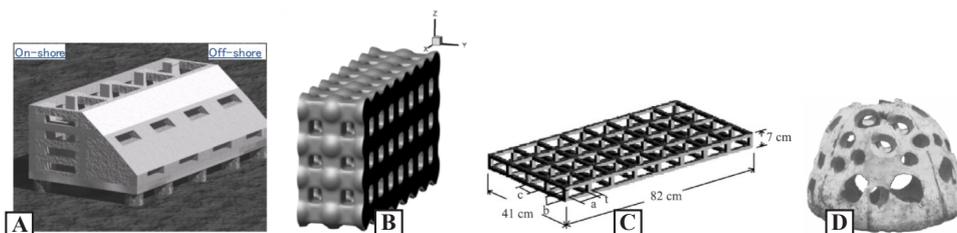


Figura 6 - Exemplos de estruturas costeiras submersas e porosas estudadas por (A) Nishihata *et al.*, (2012), (B) Wu *et al.* (2014), (C) Ting *et al.* (2004) e (D) Pilarczyk (2003).

Figure 6 - Examples of submerged and porous coastal structures studied by (A) Nishihata *et al.*, (2012), (B) Wu *et al.* (2014), (C) Ting *et al.* (2004) and (D) Pilarczyk (2003).

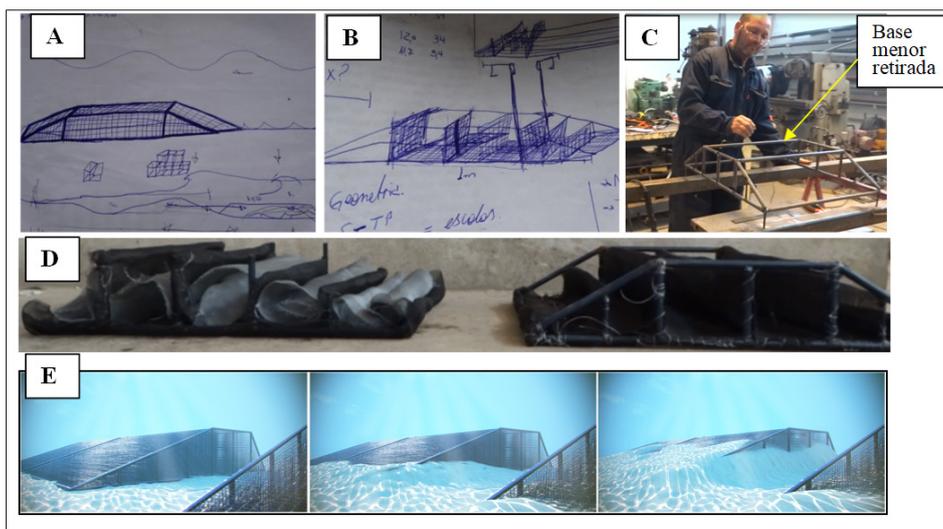


Figura 7 - Ilustração do processo de idealização e evolução conceitual do projeto de um modelo de estrutura submersa porosa (SPBW) (A, B), construção da armação da estrutura (C), “costura” das malhas de PEAD na armação (D) e projeto digital da parte responsável pela retenção de sedimentos e a formação de um banco arenoso no sistema praiial (E).

Figure 7 - Illustration of the process of idealization and conceptual evolution of the design of a submerged porous breakwater (SPBW) (A, B), construction of prototype structure (C), sewing of High Density Polyethylene (HDPE) mesh in the prototype structure (D), and design of the part responsible for the sediment retention and the formation of a sandbar in the beach system (E).

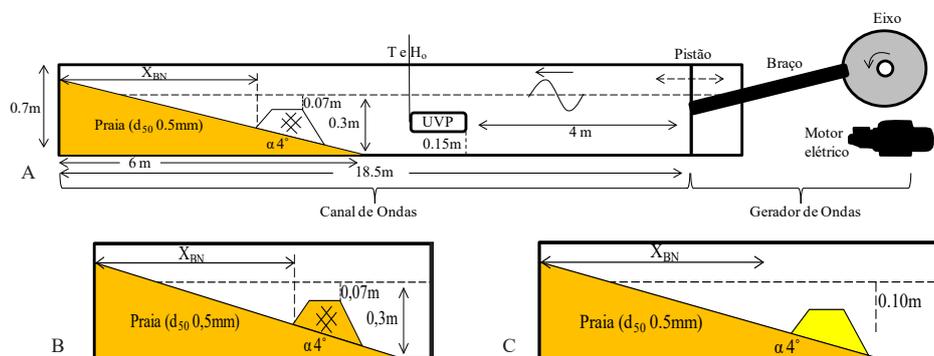


Figura 8 - Esquemas ilustrativos do canal de ondas e a condição de contorno inicial com: posicionamento de uma estrutura submersa porosa (#) e totalmente vazia ‘SPBW’ no perfil arenoso (A); estrutura submersa porosa (#) totalmente cheia ‘SPBW Cheio’ em sua base (B); e barra imersa no perfil, designado como ‘Perfil Engorda do Banco Distal’ (C).

Figure 8 - Schematic diagram of the wave channel and the initial boundary condition with: positioning of a submerged porous breakwater (#) and totally empty ‘SPBW’ in the sandy profile (A); a porous submerged breakwater (#) fully filled ‘SPBW Full’ at its base (B); and immersed bar in the profile, named “Nourishment Sandbar Profile” (C).

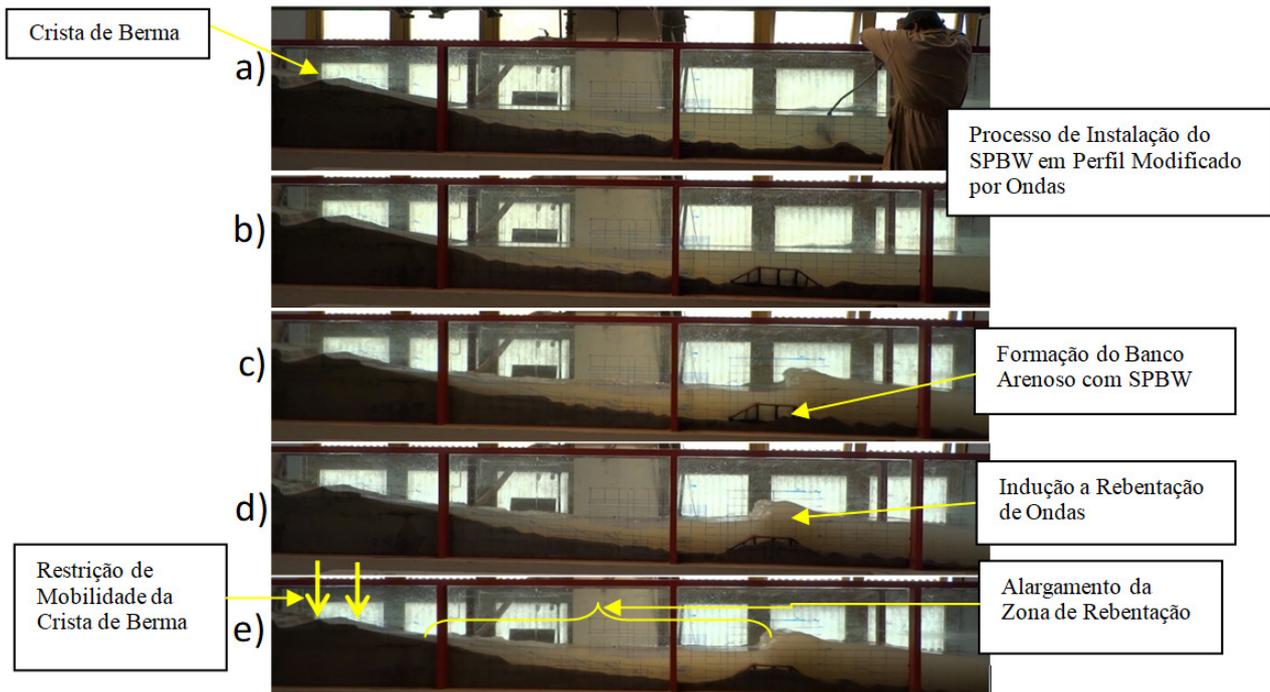


Figura 9 - Perfil arenoso modificado por ondas com (a,b) a instalação de uma estrutura submersa porosa (SPBW) no local de um antinó distal; (c) verificação da capacidade de reter areia no interior da SPBW e formação de um banco; (d) rebentação de ondas sobre o banco formado pelo SPBW; (e) formação de um perfil predominantemente dissipativo.

Figure 9 - Wave-modified sandy profile with (a, b) installation of a submerged porous breakwater (SPBW) at the distal antinode; (c) verification of the ability to retain sand within the SPBW and formation of a sandbar; (d) wave breaking on the bank formed by the SPBW; (e) formation of a predominantly dissipative profile.

possui um volume de  $55.250 \text{ cm}^3$  e foi “costurada” com malhas de polietileno de alta densidade (PEAD, ‘tela de mosquito’), em seu interior (Figura 7 D). O volume das malhas utilizado foi de aproximadamente  $27.625 \text{ cm}^3$ , resultando num protótipo de estrutura costeira submersa com porosidade aproximada de 67% (Figura 7 E). Esta variável foi calculada através da imersão de toda a estrutura flexível (malhas) num volume de controlo (proveta graduada de 7 L), o que resultou num deslocamento de 33% do volume de água.

Dessa forma, os testes com a estrutura submersa foram definidos da seguinte forma:

- ‘SPBW’: nomeia os testes que possuem uma estrutura submersa porosa (vazia) no perfil arenoso (Figura 8 A). O posicionamento da base da estrutura foi ajustado para os limites do antinó distal para as ondas utilizadas, aproximadamente a  $200 \text{ cm}$  ( $X_3$  e  $X_4$ , Figura 1- Ilustração do posicionamento dos bancos no perfil arenoso e da oscilação da superfície livre da água após a interação entre a onda refletida e a onda incidente, apresentada por Bowen (1980), utilizando o valor de  $\beta = 0.0769$  (1:13) (A). Resultado da aplicação da equação 3, identificando o posicionamento

teórico dos Antinós/Bancos e dos Nós/Cavas para diferentes períodos de onda (B.) do limite superior do perfil arenoso (duna). Na Figura 9 (a-e) está apresentado o objetivo do presente estudo com a introdução de um SPBW num perfil refletivo. A acumulação de areia no interior do SPBW formou uma barra imersa que passou a induzir a rebentação das ondas no local, originando uma larga e turbulenta zona de rebentação. A energia das ondas no espriamento não foi suficiente para atingir as zonas mais emersas do sistema arenoso criado. O objetivo foi atingido quando um perfil dissipativo de ondas foi estabelecido com uma estrutura porosa submersa (Figura 9, a-e). Ao longo destes testes foi observada a resposta da praia com a estrutura preenchida de areia, bem como o perfil de equilíbrio formado quando a estrutura ficou vazia.

- ‘SPBW cheio’: este termo nomeia os testes com a estrutura posicionada sobre o perfil arenoso e completamente preenchida de areia na condição de contorno inicial (Figura 8 - Esquemas ilustrativos do canal de ondas e a condição de contorno inicial com: posicionamento de uma estrutura submersa

porosa (#) e totalmente vazia 'SPBW' no perfil arenoso (A); estrutura submersa porosa (#) totalmente cheia 'SPBW Cheio' em sua base (B); e barra imersa no perfil, designado como 'Perfil Engorda do Banco Distal' (C). B). Verificou-se a capacidade de formação da formação arenosa dissipativa de ondas (banco) ao longo de diferentes cenários e a mobilidade das feições emersas do perfil.

- Perfil Engorda do Banco Distal: neste teste foi construído um banco imerso de areia (mesmo material do perfil) no perfil arenoso (Figura 8 - Esquemas ilustrativos do canal de ondas e a condição de contorno inicial com: posicionamento de uma estrutura submersa porosa (#) e totalmente vazia 'SPBW' no perfil arenoso (A); estrutura submersa porosa (#) totalmente cheia 'SPBW Cheio' em sua base (B); e barra imersa no perfil, designado como 'Perfil Engorda do Banco Distal' (C). C), comum na engenharia costeira (Spielman *et al.*, 2011). Foram realizados testes com duas alturas de ondas, cujo objetivo foi comparar o resultado do perfil de equilíbrio com os resultados obtidos nos testes do Perfil Natural, Perfil Herdado, SPBW e SPBW cheio.

### 3. RESULTADOS

Na Tabela 1 são apresentados 60 perfis de equilíbrio devidos à ação de ondas com valores de altura e período variando entre 1.1 e 3.6 m e de 4.66 a 13.86 s, respectivamente. A combinação destes valores representa o clima de ondas típico de uma praia oceânica exposta a ondas de elevada energia (Nemes, 2016).

A análise da variabilidade morfológica dos perfis de equilíbrio dos testes 'Perfil Natural' (Figura 10 a) e 'Perfil Herdado' (Figura 10 b) mostra que estes apresentaram formas típicas de crista da berma, espraiamento, degrau, cava e banco arenoso emerso e imerso (Tabela 1 - Testes efetuados para várias alturas e períodos de ondas. e Figura 10). A transição entre um perfil refletivo e dissipativo é estabelecida para valores de declividade da onda crítico entre 2 e 2.5 (Tabela 1 - Testes efetuados para várias alturas e períodos de ondas.). O banco imerso mais afastado da praia só foi reproduzido pelos tipos de ondas com declividade acima de 2. Na natureza esta configuração sugere um perfil dissipativo.

Durante os testes o fenômeno destrutivo/erosivo também foi reproduzido, simulando a natureza de recessão do limite superior do perfil, ou seja, a erosão da duna (Tabela 1 - Testes efetuados para várias alturas e períodos de ondas.). Isto ocorreu quando o perfil arenoso ('Perfil Herdado') não apresentou obstáculos imersos como

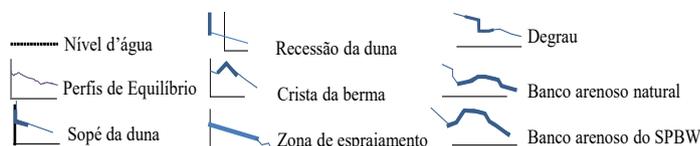
condição inicial para as ondas seguintes. Esta situação possibilitou a incidência da energia das ondas na zona mais emersa do perfil, causando a recessão do perfil até - 18 cm da duna (Figura 10 a), equivalente a 3.6 m no protótipo. Na ausência de uma forma morfológica dissipativa predominante no perfil da praia (Figura 10 a), ocorreu uma mobilidade horizontal significativa do perfil (Figura 10 a).

Os resultados obtidos com a introdução da estrutura porosa (SPBW) no perfil arenoso (Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes 'Perfil Natural' e 'Perfil Herança' (a), 'Perfil SPBW' (b), 'Perfil SPBW Cheio' (c) e 'Perfil Engorda do Banco Distal' (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. b) demonstram que o sistema foi capaz de ativar a formação de um banco imerso, com a formação de um perfil dissipativo. A amplitude vertical e horizontal de variação do perfil arenoso foi significativamente reduzida após a introdução do SPBW (b) em relação aos perfis 'Natural e Herdado' (a). Esta redução foi de aproximadamente 50% da mobilidade da crista da berma, o que definiu perfis com declives mais suaves. A forma do banco imerso construído artificialmente pelo SPBW foi muito similar aos formados pelos perfis 'Natural' e 'Herdado' (Figura 11).

Na Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes 'Perfil Natural' e 'Perfil Herança' (a), 'Perfil SPBW' (b), 'Perfil SPBW Cheio' (c) e 'Perfil Engorda do Banco Distal' (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. b, estão destacados a vermelho os perfis de equilíbrio onde se impediu a retenção de areia. Isto foi feito colocando um calço de um centímetro entre o perfil e o SPBW. Desse modo, a estrutura porosa sugerida para proteção costeira apenas tem como objetivo dissipar a energia da onda aquando da sua passagem pela estrutura porosa (Pilarczyk, 2003, Ting *et al.*, 2004; Akbari e Namin, 2013, Wu e Hsiao, 2013; Wu *et al.*, 2014 e Metallinos *et al.*, 2016). Apesar de estudos anteriores referirem que há uma dissipação média de 25% da energia das ondas por uma estrutura porosa, o resultado do perfil arenoso ainda é muito similar ao Perfil Natural (Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes 'Perfil Natural' e 'Perfil Herança' (a), 'Perfil SPBW' (b), 'Perfil SPBW Cheio' (c) e 'Perfil Engorda do Banco Distal' (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. a). A Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes 'Perfil Natural' e 'Perfil Herança' (a), 'Perfil SPBW' (b), 'Perfil SPBW Cheio' (c) e 'Perfil Engorda do Banco Distal' (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. b demonstra que é mais

Tabela 1 - Testes efetuados para várias alturas e períodos de ondas.  
 Table 1 - Tests performed for various wave heights and wave periods.

Fase	Perfil de fundo	T (s)	Hi (cm)	REAL (m)	REAL (s)	Declividade (H <sub>o</sub> /L <sub>o</sub> )	Perfil de Equilíbrio (d/l)
				$eL = H_{mod}/H_{real}$	$eT = \sqrt{eL}$		
				Escala de H	Escala de T		
				0.05	0.2236		
4	SPBW Cheio	2.98	5.5	1.1	13.31	0.40	
4	SPBW Cheio	2.98	5.7	1.14	13.31	0.41	
4	SPBW Cheio	2.7	6.6	1.32	12.06	0.58	
3	SPBW	2.7	6.8	1.36	12.06	0.60	
1	Perfil Natural	2.55	6.8	1.36	11.41	0.67	
3	SPBW	2.55	6.8	1.36	11.41	0.67	
2	Herdado	2.55	6.8	1.36	11.41	0.67	
1	Herdado	2.55	6.8	1.36	11.41	0.67	
4	SPBW Cheio	2.98	9.5	1.9	13.31	0.69	
1	Perfil Natural	2.98	11	2.22	13.31	0.80	
2	Perfil Natural	2.98	11	2.22	13.31	0.80	
1	Perfil Natural	2.98	11	2.22	13.31	0.80	
2	Engorda do Banco Distal	2.55	8.2	1.64	11.41	0.81	
2	Herdado	2.98	13	2.5	13.31	0.90	
1	Perfil Natural	2.34	8.2	1.64	10.47	0.96	
1	Perfil Natural	2.34	8.2	1.64	10.47	0.96	
2	Perfil Natural	2.98	13	2.66	13.31	0.96	
3	SPBW	2.98	14	2.7	13.31	0.98	
3	SPBW	3.1	16	3.1	13.86	1.03	
4	SPBW Cheio	1.88	6	1.2	8.41	1.09	
4	SPBW Cheio	1.88	6	1.2	8.41	1.09	
2	Perfil Natural	2.01	7	1.4	9.00	1.11	
3	SPBW	1.88	6.5	1.3	8.41	1.18	
4	SPBW Cheio	2.07	8.1	1.62	9.26	1.21	
3	SPBW	2.07	8.2	1.64	9.26	1.23	
1	Perfil Natural	1.88	6.8	1.36	8.41	1.23	
2	Perfil Natural	1.88	6.8	1.36	8.41	1.23	
2	Perfil Natural	1.88	6.8	1.36	8.41	1.23	
1	Herdado	1.88	6.8	1.36	8.41	1.23	
2	Herdado	1.88	6.8	1.36	8.41	1.23	
2	Perfil Natural	2.55	13	2.54	11.41	1.25	
3	SPBW	1.88	7	1.4	8.41	1.27	
4	SPBW Cheio	2.07	8.5	1.7	9.26	1.27	
2	Herdado	2.01	8.2	1.64	9.00	1.30	
2	Herdado	2.01	8.2	1.64	9.00	1.30	
2	Herdado	2.98	18	3.6	13.31	1.30	
2	Herdado	2.98	18	3.6	13.31	1.30	
3	SPBW	2.55	15	3.02	11.41	1.48	
3	SPBW	2.55	15	3.02	11.41	1.48	
2	Herdado	2.55	15	3.02	11.41	1.48	
2	Perfil Natural	1.57	7.6	1.52	7.02	1.97	
2	Herdado	1.57	7.6	1.52	7.02	1.97	
4	SPBW Cheio	2.07	14	2.7	9.26	2.01	
2	Engorda do Banco Distal	2.01	14	2.7	9.00	2.13	
4	SPBW Cheio	2.01	14	2.7	9.00	2.13	
4	SPBW Cheio	2.07	15	2.9	9.26	2.17	
2	Perfil Natural	1.88	13	2.56	8.41	2.32	
3	SPBW	2.27	20	3.9	10.14	2.43	
2	Herdado	2.27	20	3.9	10.14	2.43	
1	Perfil Natural	1.7	11	2.22	7.61	2.46	
3	SPBW	1.35	7	1.4	6.04	2.46	
4	SPBW Cheio	1.35	7.6	1.52	6.04	2.67	
3	SPBW	2.013	17	3.4	9.00	2.67	
3	SPBW	2.01	17	3.4	9.00	2.69	
4	SPBW Cheio	1.34	7.5	1.5	5.97	2.69	
3	SPBW	1.42	9	1.8	6.34	2.87	
4	SPBW Cheio	1.34	8.6	1.72	5.97	3.09	
2	Perfil Natural	1.44	12	2.4	6.45	3.69	
2	Perfil Natural	1.44	13	2.56	6.45	3.94	
2	Herdado	1.04	13	2.5	4.66	7.36	



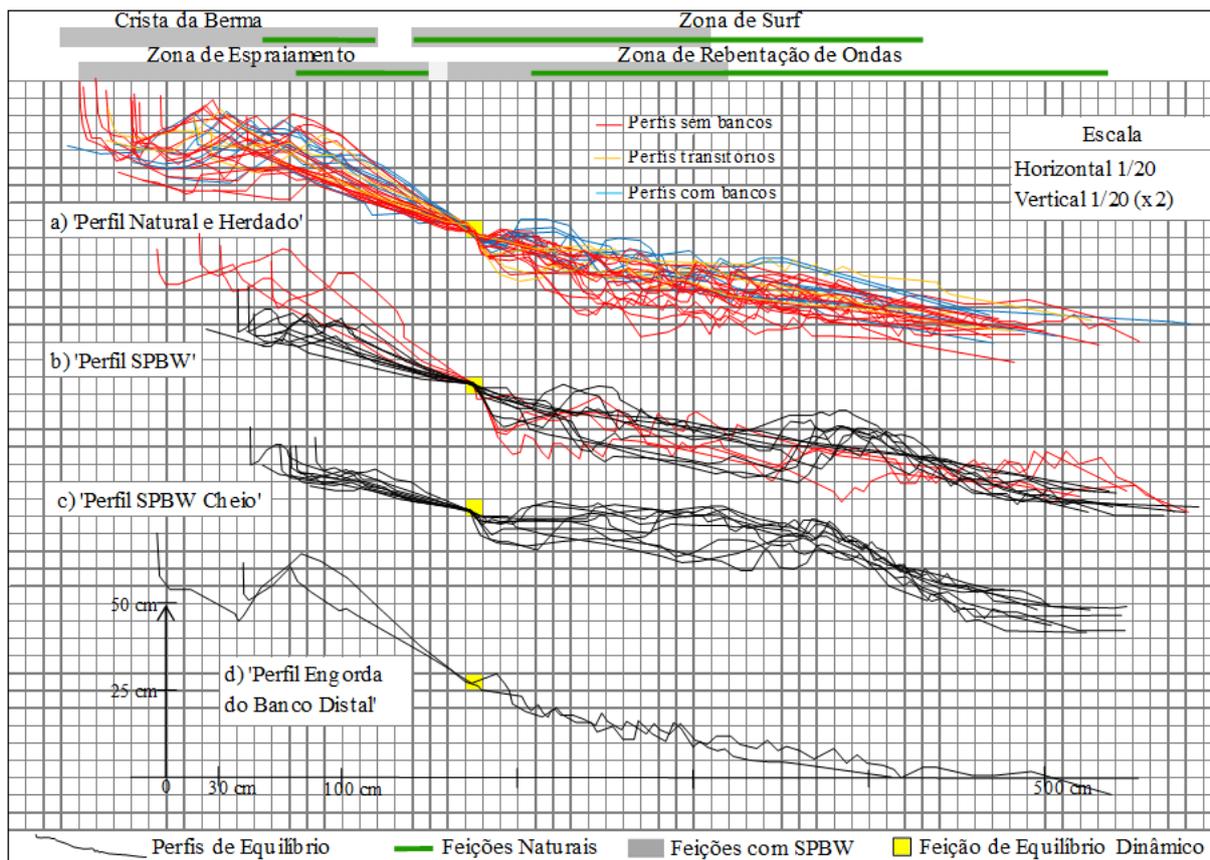


Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes ‘Perfil Natural’ e ‘Perfil Herança’ (a), ‘Perfil SPBW’ (b), ‘Perfil SPBW Cheio’ (c) e ‘Perfil Engorda do Banco Distal’ (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior.

Figure 10 - Equilibrium profiles generated by the ‘Natural Profile’ and ‘Inheritance Profile’ (a), ‘SPBW Profile’ (b), ‘Full SPBW Profile’ (c) and ‘Nourishment Sandbar Profile’ (d). In tests (b) the cases highlighted in red demonstrate that the SPBW did not retain sand in its interior.

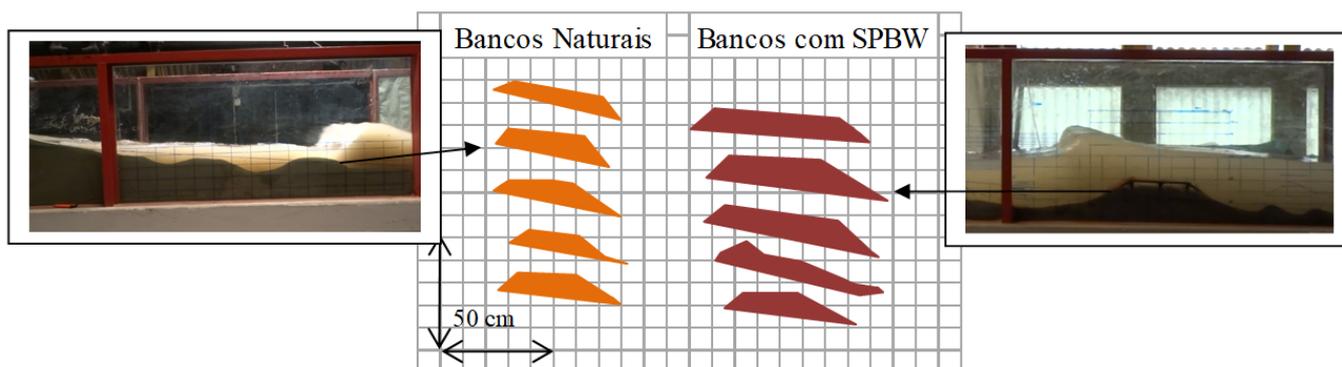


Figura 11 - Comparação entre os bancos do Perfil Natural e os bancos formados com o SPBW.

Figure 11 - Comparison between the Natural Profile sandbars and the sandbars formed by the SPBW.

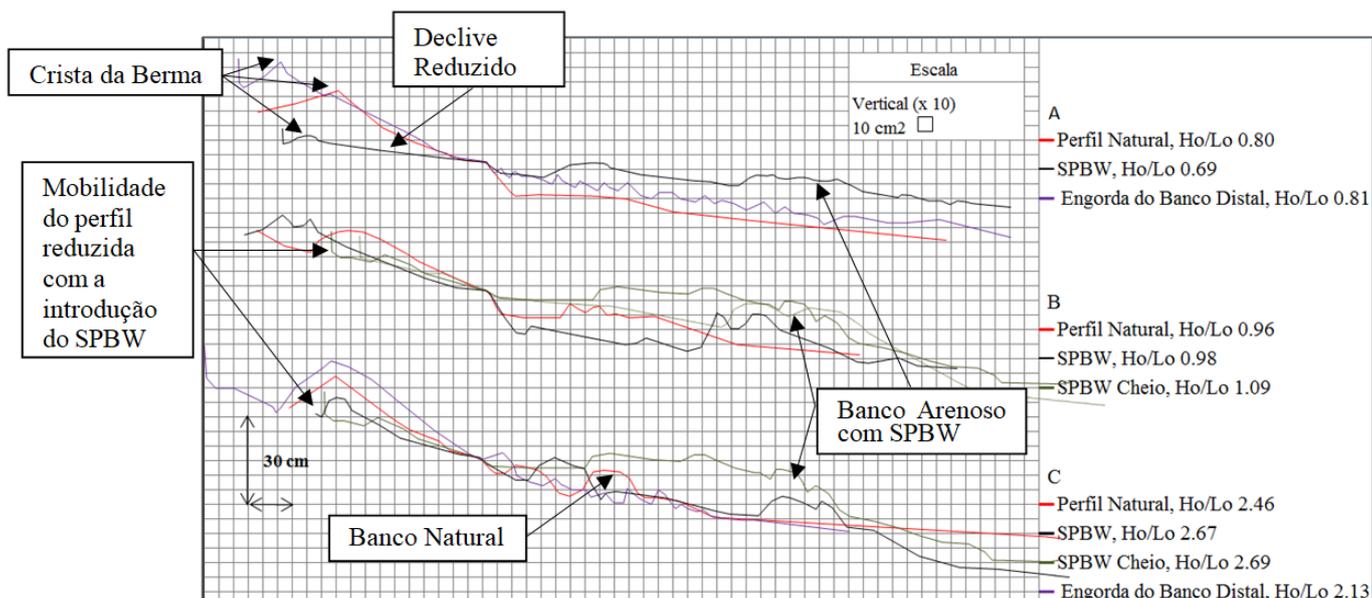


Figura 12 - Perfis de equilíbrio para 4 ondas distintas, mas com declividades (H/L) similares.

Figure 12 - Equilibrium profiles for four different waves, but with similar steepness (H/L).

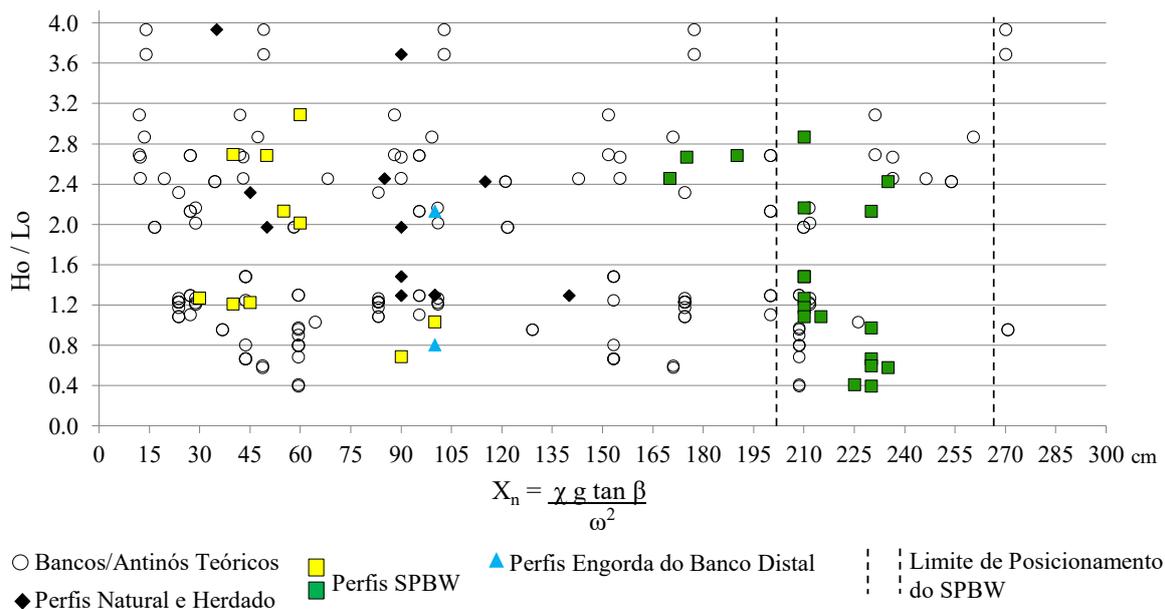


Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa porosa.

Figure 13 - Positioning variability of sandbars calculated according to Bowen (1980), for the waves measured in the tests carried out with movable bed with and without submerged porous structure.

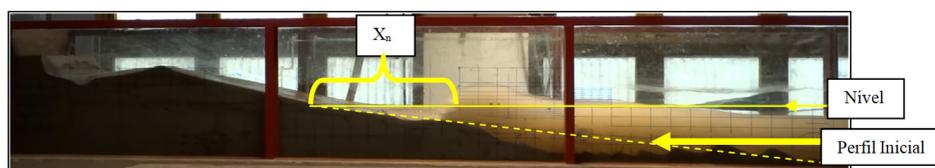


Figura 14 - Imagem do perfil arenoso do teste “Perfil Herança”.

Figure 14 - Image of the sandy profile of the “Inheritance Profile” test.

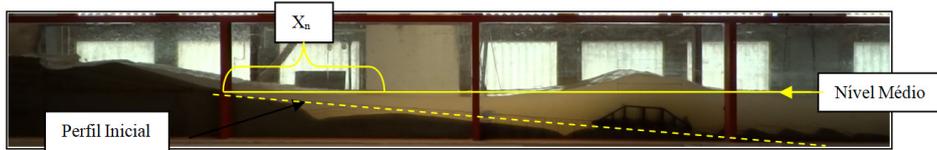


Figura 15 - Imagem do perfil arenoso com uma estrutura submersa porosa sem a retenção de areia, criando morfologias similares a um “Perfil Natural”.

Figure 15 - Image of the sandy profile with a submerged porous structure without the retention of sand, creating morphologies similar to a “Natural Profile”.

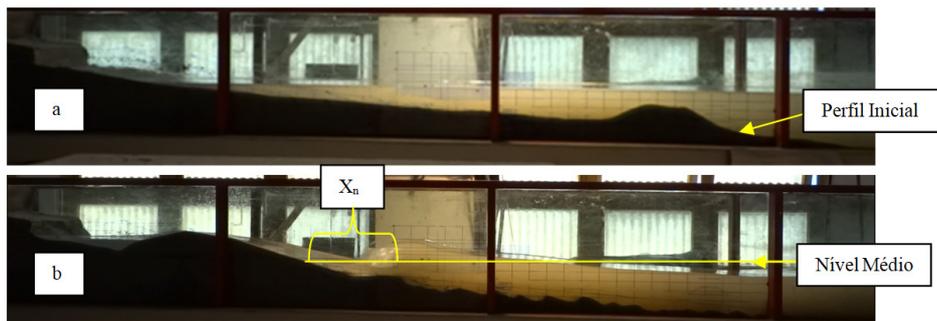


Figura 16 - Evolução de um perfil com a (a) engorda do banco distal e o (b) perfil de equilíbrio gerado pela ação das ondas.

Figure 16 - Evolution of a profile with (a) nourishment sandbar and (b) equilibrium profile generated by wave action.

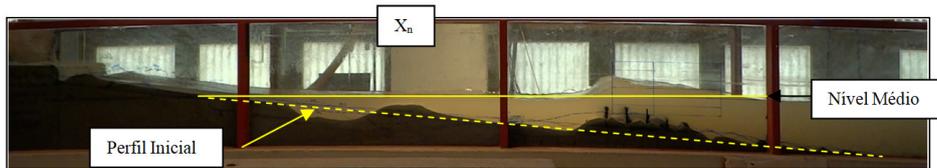
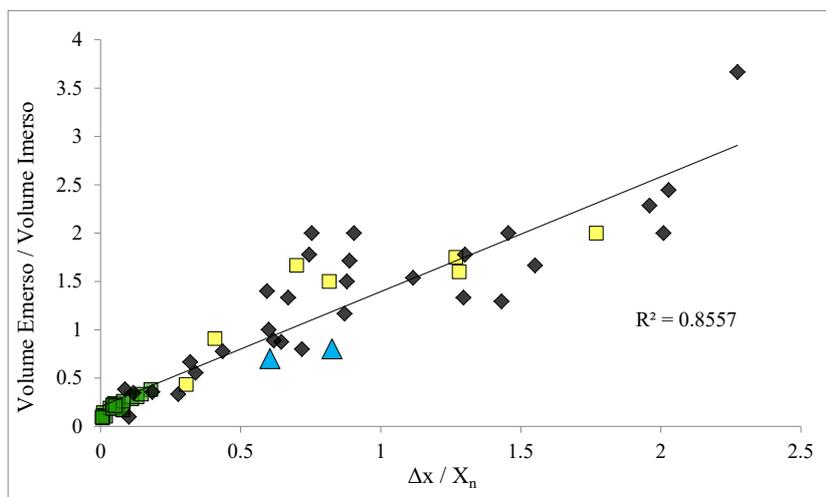


Figura 17 - Imagem do perfil arenoso com uma estrutura submersa porosa gerando uma configuração morfológica dissipativa através da retenção de sedimentos no seu interior.

Figure 17 - Image of the sandy channel with a porous submerged structure generating a dissipative morphological configuration through sediment retention in its interior.



◆ Perfis Natural e Herdado    ■ Perfis SPBW    ▲ Perfis Engorda do Banco Distal

Figura 18 - Volume de sedimentos ao longo do perfil de equilíbrio para cada cenário em relação à largura do espraçamento ( $\Delta x$ ) e da zona de dissipação ( $X_n$ ).

Figure 18 - Sediment volume along the equilibrium profile for each scenario in relation to the run-up width ( $\Delta x$ ) and the dissipation zone ( $X_n$ ).

eficiente proteger a linha de costa induzindo a rebentação das ondas, com o método que ativa a formação de um banco mais afastado da zona emersa da praia. Isto também reduz o declive do perfil e a variabilidade horizontal das formas emersas sendo, portanto, mais eficiente do que tentar dissipar parte da energia das ondas com uma estrutura porosa (Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes ‘Perfil Natural’ e ‘Perfil Herança’ (a), ‘Perfil SPBW’ (b), ‘Perfil SPBW Cheio’ (c) e ‘Perfil Engorda do Banco Distal’ (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. b).

Os resultados da evolução do perfil de equilíbrio com o ‘SPBW Cheio’ estão apresentados na Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes ‘Perfil Natural’ e ‘Perfil Herança’ (a), ‘Perfil SPBW’ (b), ‘Perfil SPBW Cheio’ (c) e ‘Perfil Engorda do Banco Distal’ (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. c. O espalhamento do excesso de areia sobre o SPBW gerou a formação de múltiplos bancos imersos, gerando mais dissipação da energia das ondas antes do espriamento. Isto pode ser observado pela baixa variabilidade horizontal e vertical do perfil arenoso, confirmando a eficiência da estratégia da engenharia em reter sedimentos e a estabilizar o perfil. Já a estratégia de construção de um banco arenoso imerso no perfil da praia (Figura 10 - Perfis de equilíbrio gerados pelos testes ‘Perfil Natural’ e ‘Perfil Herança’ (a), ‘Perfil SPBW’ (b), ‘Perfil SPBW Cheio’ (c) e ‘Perfil Engorda do Banco Distal’ (d). Nos testes (b) os casos destacados a vermelho demonstram que o SPBW não reteve areia no seu interior. d) resulta no espalhamento total da areia e na construção de uma barra emersa íngreme para uma das ondas, o que já foi descrito por Spielmann *et al.* (2011). Isto é ineficiente para a estratégia de dissipação da energia das ondas mais afastadas da zona emersa do perfil. Por outro lado, é uma eficiente técnica para reposição de sedimentos na face praiial (Spielman *et al.*, 2011).

Na Figura 12 é apresentada uma comparação dos resultados para três declividades da onda ( $H/L_0$ ) e os perfis de equilíbrio utilizando estratégias de engenharia costeira diferentes. Os tipos de ondas selecionados permitem formar o perfil de degrau ou refletivo (Figura 12 a), o perfil de transição (Figura 12 b) e o perfil com bancos arenosos imersos (Figura 12 c). Em todos os casos, ao introduzir o SPBW o declive do perfil diminuiu e a mobilidade da crista de berma foi reduzida. Mesmo com a presença dos bancos naturais (c), após a introdução do SPBW e com este totalmente cheio, o declive da praia diminuiu significativamente.

As formas imersas construídas com a utilização de um

SPBW demonstram ser significativamente eficientes na redução da inclinação e variabilidade horizontal e vertical do perfil. Na Figura 13 está apresentado o resultado do posicionamento teórico da formação da barra (○, antinó) para cada período de onda combinado com as medições dos bancos do ‘Perfil Natural’ e ‘Herdado’ (◆), Engorda do Banco Distal (▲), ‘SPBW’ sem retenção de sedimentos (■) e o ‘SPBW’ com retenção de areia e ‘SBW cheio’ (■).

A comparação dos resultados medidos com os teóricos (Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa porosa.) sugere que:

- O posicionamento dos bancos do “Perfil Natural” e “Herdado” (Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa porosa. ◆) foi semelhante ao teórico, embora se possam observar ligeiros desvios, provavelmente provocados por efeitos de escala. Geralmente a zona de rebentação apresentava uma extensão reduzida, com elevados níveis de espriamento (Figura 14) e vulnerabilidade aos processos erosivos da duna;
- O resultado da utilização do SPBW sem retenção de sedimentos (Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa porosa. ■) demonstrou que o banco arenoso imerso se desenvolveu de forma semelhante à formação teórica. Isto significa que tentar dissipar a energia da onda apenas com uma estrutura porosa não é eficiente para controlar a morfodinâmica do perfil arenoso transversal (Figura 15);
- A partir de um perfil praiial com o método de Engorda do Banco Distal (Figura 16) os resultados demonstram que a hidrodinâmica do sistema consegue “espalhar” a areia e o perfil de equilíbrio torna-se similar ao ‘Perfil Natural’. Como intervenção de dissipação da energia das ondas este método não apresenta a necessária eficácia e longevidade, sendo fundamental a reconstituição do banco antes de cada teste (Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa

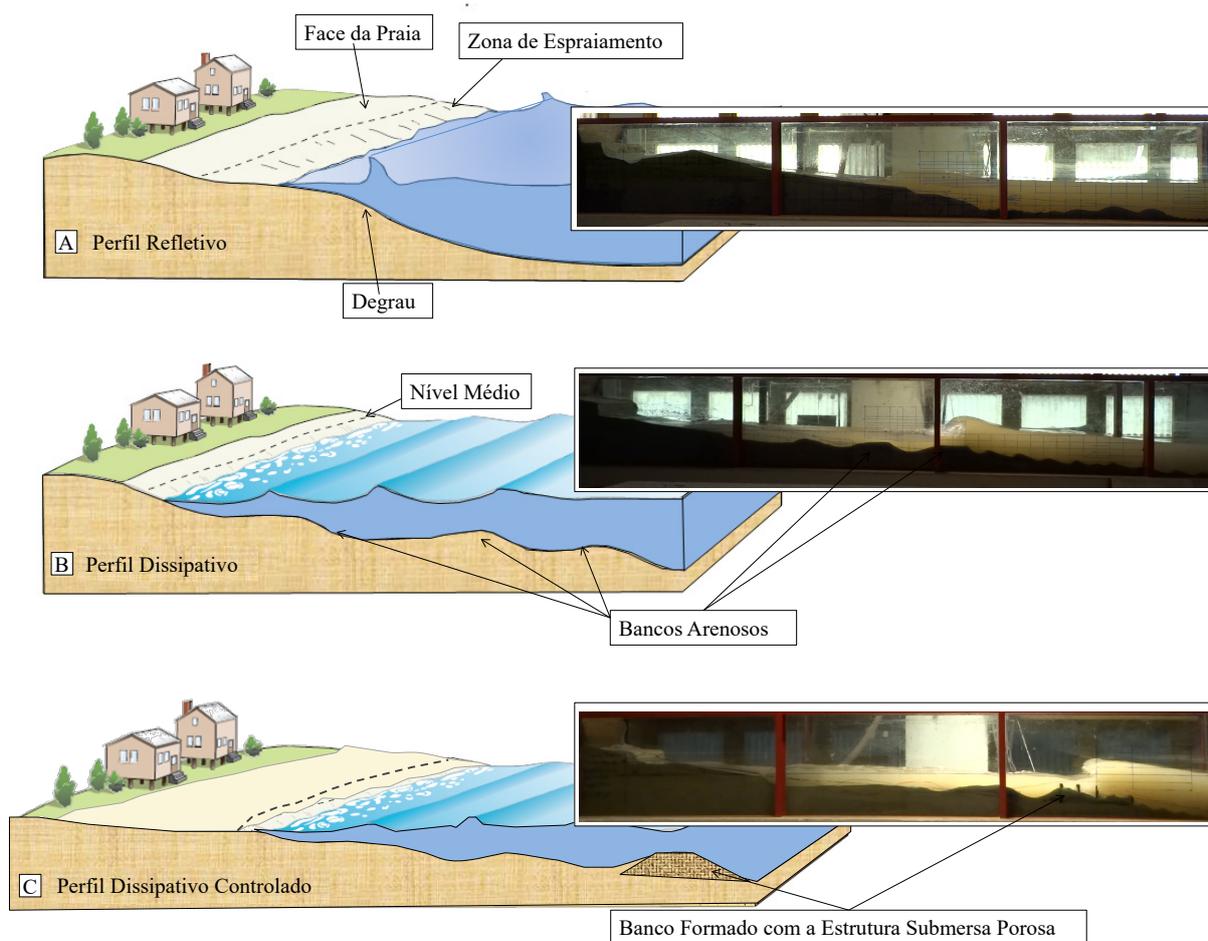


Figura 19 - Ilustração do tipo de perfis de praias arenosas e o controle morfodinâmico dissipativo com a introdução de uma estrutura submersa porosa (adaptado de Pilkey *et al.*, 2011).

Figure 19 - Illustration of the type of sandy beach profiles and of the dissipative morphodynamic control with the introduction of a submerged porous structure (adapted from Pilkey *et al.*, 2011).

porosa. ▲);

- O posicionamento de um SPBW (Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa porosa. ■) sobre um antinó do sistema oscilatório demonstrou a capacidade de ativar ou mesmo controlar o posicionamento de um banco arenoso distal sobre o perfil. A acumulação de areia no SPBW reduziu a profundidade neste local e passou a induzir a rebentação das ondas. Um perfil dissipativo foi alcançado com o SPBW totalmente preenchido com areia (Figura 17), permitindo uma estabilidade vertical e horizontal para todas as ondas testadas.

Com a introdução de uma estrutura submersa porosa

(SPBW) foi possível controlar a morfodinâmica do perfil arenoso. Isto pode ser observado pelo volume de areia que permaneceu imerso na zona de rebentação (Figura 18 - Volume de sedimentos ao longo do perfil de equilíbrio para cada cenário em relação à largura do espreadimento ( $\Delta x$ ) e da zona de dissipação ( $X_n$ .) em forma de bancos arenosos. O controle da largura da zona de rebentação num perfil de praia do tipo oceânica determina a distribuição sedimentar do sistema. De um modo geral, um perfil do tipo refletivo foi transformado num perfil com banco distal de rebentação de onda, ou perfil dissipativo.

#### 4. DISCUSSÃO

A modificação da distribuição da energia da onda sobre um perfil arenoso e a sua transferência para a morfodinâmica do sistema é muito eficiente (Wright e Short, 1984; Longuet-Higgins e Stewart, 1964). Os testes realizados no

canal de ondas com fundo móvel permitiram reproduzir o balanço hidrodinâmico gerado por ondas de elevada e baixa declividade ( $H/L$ ). Isto permitiu observar a formação dos perfis de equilíbrio refletivo (Figura 19 - Ilustração do tipo de perfis de praias arenosas e o controle morfodinâmico dissipativo com a introdução de uma estrutura submersa porosa (adaptado de Pilkey et al., 2011). A) e dissipativo (Figura 19 - Ilustração do tipo de perfis de praias arenosas e o controle morfodinâmico dissipativo com a introdução de uma estrutura submersa porosa (adaptado de Pilkey et al., 2011). B), semelhantes aos observados em estudos anteriores (Bowen, 1980). Já com a modificação da zona de rebentação das ondas relativamente à situação natural (Figura 19 - Ilustração do tipo de perfis de praias arenosas e o controle morfodinâmico dissipativo com a introdução de uma estrutura submersa porosa (adaptado de Pilkey et al., 2011). C), a morfologia do perfil foi alterada.

O presente estudo analisou a hipótese de combinar o mecanismo de ação hidrodinâmica natural de cada tipo de onda (Bowen, 1980) com o posicionamento de uma estrutura submersa porosa (SPBW) numa zona distal de formação de antinós (200 cm, Figura 13 - Variabilidade de posicionamento dos bancos imersos calculados de acordo com Bowen (1980), para as ondas medidas nos testes realizados com fundo móvel sem e com estrutura submersa porosa.). Os resultados demonstraram que esta estratégia de engenharia de costa foi eficiente para ativar a formação de uma barra submersa capaz de induzir a rebentação das ondas. Isto foi realizado utilizando a hipótese de retenção de partículas em suspensão e arrastadas numa estrutura submersa porosa, proposta por Wu *et al.* (2014). Uma zona mais extensa de dissipação da energia das ondas limitou as modificações horizontais e verticais do perfil arenoso (Figura 12 - Perfis de equilíbrio para 4 ondas distintas, mas com declividades ( $H/L$ ) similares. b).

O comportamento hidrodinâmico para cada onda organiza o perfil morfológico da praia a sotamar da estrutura submersa (Ting e Kirby, 1995). Isto deve-se a que a variação de nível e o excesso de quantidade de movimento provocado pelas ondas em águas pouco profundas não são interrompidos com as estruturas submersas. Além disso, a largura da crista do banco arenoso formado pelo SPBW é similar à dos bancos arenosos antes da sua instalação, não sendo suficientemente amplo para poder reduzir totalmente a transmissão da onda (Kobayashi *et al.*, 2007). Convém esclarecer que utilizando o SPBW com a retenção de areia no seu interior não é modificado o tipo de praia, de acordo com a classificação de Wright e Short (1984). Com o SPBW, a praia passa a apresentar um banco de rebentação mais distal do que o normal, o que por sua vez ainda preserva a quantidade de movimento e massa (sobrelevação do nível) na linha de costa. Por

outro lado, a energia da onda na zona de espraiamento é significativamente reduzida, protegendo a linha da costa.

O desenvolvimento da estratégia de engenharia costeira submersa com uma estrutura porosa (SPBW) atende às exigências de redução do volume de materiais necessários numa obra costeira (Black e Mead, 2009), bem como potencializa a sua estabilidade e eficiência sobre um perfil arenoso (Sumer e Fredsoe, 2012). Há um potencial risco de erosões ao redor da base de obras impermeáveis no sistema praias, principalmente com estruturas apoiadas sobre o perfil arenoso (Borrero e Nelsen, 2003; Jackson *et al.*, 2003; Neves *et al.*, 2015; Kiran *et al.*, 2015). Geralmente, para recuperar uma obra em colapso são utilizados ajustes com materiais porosos (Stauble e Tabar, 2003; Sumer e Fredsoe, 2012; Sumer, *et al.*, 2001; Dean *et al.*, 1997). Por isso é importante desenvolver uma estratégia com uma estrutura que se integre no sistema hidrodinâmico natural de perfis arenosos.

Quando uma estrutura de fundo permeável é utilizada para dissipar parte da energia da onda, Ting *et al.* (2004), Wu *et al.* (2014) explicam que apenas a fase entre a elevação da superfície livre da água provocado pela passagem da onda e o seu campo de velocidades são modificados. As forças de resistência ao escoamento (Kobayashi *et al.*, 2007; Akbari e Namin, 2013), através da diferença de fase entre o fluxo interno e o externo quando a onda passa pela estrutura submersa porosa (Losada *et al.*, 1996), podem resultar no desenvolvimento de um perfil morfológico suave (Jacobsen e Fredsoe, 2014). Contudo, a maior eficiência para controlar a variabilidade morfológica do perfil arenoso observou-se com uma larga zona de rebentação da onda.

Os resultados alcançados com os testes de um SPBW em fundo móvel não podem ser obtidos com um tipo de estrutura impermeável (Neves *et al.*, 2015). Os princípios físicos de uma estrutura submersa impermeável (Ahrens, 1987; Ahrens e Fulford, 1988; Losada *et al.*, 1996; Beji e Battjes, 1993) modificam o padrão natural dos fluxos horizontais na coluna de água da zona de rebentação (Sumer, *et al.*, 2001), criando outro tipo de estrutura oscilante a sotamar após a redução da transmissão da onda sobre a sua crista (Kobayashi *et al.*, 2007).

## 5. CONCLUSÕES

Os testes conduzidos num canal de ondas com fundo móvel demonstraram que o posicionamento de uma estrutura submersa porosa (SPBW) no antinó da oscilação estacionária sobre o perfil arenoso consegue ativar os processos de sedimentação até formar um banco arenoso dissipativo no local. O mecanismo que controla a organização sedimentar transversal à praia e a formação das estruturas arenosas foi considerado para referência

de posicionamento do SPBW no perfil. As dimensões geométricas do modelo de estrutura submersa porosa (SPBW) foram baseadas nas formações morfológicas do 'Perfil Natural'. Foi assim desenvolvida uma estrutura submersa porosa de modo integrado com a morfodinâmica do perfil arenoso.

O presente estudo considerou a teoria que explica a formação de bancos imersos no perfil arenoso transversal e definiu com uma estrutura porosa que foi capaz de controlar a variabilidade morfológica horizontal e vertical sobre a ação de diferentes tipos de ondas. Um perfil com características refletivas e vulnerável à erosão foi transformado num perfil dissipativo, com banco distal de rebentação de onda, com uma zona de rebentação mais extensa e com baixo declive da zona emersa. Estas características fazem com que esta estratégia de engenharia tenha como potencial uso a proteção e estabilização de uma praia arenosa com processos erosivos.

O estudo foi realizado com um modelo físico construído à escala geométrica de 1/20, para a qual as escalas para modelos de fundos móveis são razoavelmente bem entendidas, ao contrário dos erros e das incertezas devidos aos efeitos de escala (Van Rijn *et al.*, 2011). As conclusões do presente estudo expressam a dinâmica qualitativa de um perfil transversal de praia do tipo oceânica exposta à ação de ondas, onde as formações morfológicas e o modelo de estrutura costeira desenvolvido obedecem à escala definida.

Por se tratar de uma estrutura porosa, é mais leve do que a tradicional instalação de quebra-mares e obras aderentes em enrocamento ou perpendiculares à linha de costa, podendo ser economicamente mais atrativa. Além disso, as conclusões obtidas neste estudo incentivam a realização de novos testes experimentais, com modelos hidrodinâmicos tridimensionais. A análise do comportamento do SPBW com ondas irregulares e oblíquas em relação à praia possibilitaria o desenvolvimento de um protótipo otimizado.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Capes, Ministério de Educação do Brasil, processo 4581/14-8; aos colegas que contribuíram para o presente estudo do Instituto de Mecânica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA, Facultad de Ingeniería, Uruguai) e do Laboratório de Dinâmica de Sedimentos Coesivos (LDSC, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil).

## REFERÊNCIAS

Ahrens, J. P. (1987) – Characteristics of Reef Break Waters, U.S. Army Corps of Engineers Coastal Engineering Research Center, TR 87-17, Vicksburg, MS, 66p. Available on-line at <http://oai.dtic.mil/oai/oai?verb=getRecord&metadataPrefix=html&identifier=ADA189036>

- Ahrens, J. P.; Fulford, E. T. (1988) – Wave Energy Dissipation by Reef Breakwaters. *Oceans '88*, Marine Technology Society, Washington, pp.1244-1249. Available on-line at <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=794965>
- Akbari, H.; Namin, M. M. (2013) – Moving particle method for modeling wave interaction with porous structures. *Coastal Engineering*, 74:59–73. Available on-line at <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.12.002>
- Alsina, J. M.; Cáceres, I.; Brocchini, M.; Baldock, T. E. (2012) – An experimental study on sediment transport and bed evolution under different swash zone morphological conditions. *Coastal Engineering*, 68:31–43. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.04.008>
- Beji, S.; Battjes, J. A. (1993) – Experimental Investigation of Wave Propagation Over a Bar. *Coastal Engineering*, 19:151-162. DOI: 0378-3839/93/\$06.00
- Benedet, L.; Dobrochinski, J. P. F.; Walstra, D. J. R.; Klein, A. H. F.; Ranasinghe, R. A. (2016) – Morphological modeling study to compare different methods of wave climate schematization and evaluate strategies to reduce erosion losses from a beach nourishment Project. *Coastal Engineering*, 112:69–86. Available on-line at <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2016.02.005>
- Black, K.; Mead, S. (2009) – Design of Surfing Reefs. *Reef Journal*, 1:177-191. Available on-line at [http://thereefjournal.com/files/14\\_Black\\_and\\_Mead.pdf](http://thereefjournal.com/files/14_Black_and_Mead.pdf)
- Borrero, J. C., NELSEN, C. (2003) - Results of a Comprehensive Monitoring Program at Pratte's Reef., *Artificial Surfing Reefs*, pp.83–98. Available on-line at <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/1172>
- Bowen, A. J. (1980) – Simple Models of Nearshore Sedimentation. In: McCann, S. B. (ed.), *The Coastline of Canada*, *Geological Survey of Canada*, 80:1–11. ISBN 0-660-1071 0-4.
- C.E.M. (2006) – Coastal Engineering for Environmental Enhancement. In: *Coastal Engineering Manual*. Coastal Engineering Research Center, US Army Corps of Engineers US Government Printing Office, Washington, DC, 1720p. Available on-line at <http://www.usace.army.mil/inet/usace-docs/eng-manuals/cecw.htm>
- Cheng, J.; Wang, P.; Smith, E. R. (2016) – Hydrodynamic Conditions Associated with an Onshore Migrating and Stable Sandbar. *Journal of Coastal Research*, 32(1):153–163. <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-14-00174.1>
- Dean, R. G.; Chen, R.; Browder, A. E. (1997) – Full scale monitoring study of a submerged breakwater, Palm Beach, Florida, USA. *Coastal Engineering*, 29:291-315. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(96\)00028-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(96)00028-2)
- Drake, T. G.; Calantoni, J. (2001) – Discrete Particle Model for Sheet Flow Sediment Transport in the Nearshore. *Journal of Geophysical Research*, 106:19859-19868.
- Grasso, F.; Michallet, H.; Barthélemy, E.; Certain, R. (2009) – Physical modeling of intermediate cross-shore beach morphology: transients and equilibrium states. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(C09001). <https://doi.org/10.1029/2009JC005308>
- Gourlay, M. R. (1980) – Beaches: Profiles, Processes and Permeability. In: *Proceedings 17th Coastal Engineering Conference*, Sydney, p.1320-1339. ISBN: 978-0-7844-7959-9.

- Heller, V. (2011) – Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3):293–306. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2011.578914>
- Hoefel, F. G.; Elgar, S. (2003) – Wave-Induced sediment transport and sandbar migration. *Science*, 299:1885-1887. Available on-line at [http://falk.ucsd.edu/reading/hoefel\\_science03.pdf](http://falk.ucsd.edu/reading/hoefel_science03.pdf)
- Jacobsen, N. G.; Fredsoe, J. (2014) - Formation and Development of a Breaker Bar Under Regular Waves. Part 2: Sediment Transport and Morphology. *Coastal Engineering*, 88:55–68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.12.008>
- Jackson, L. A., Tomlinson, R. B., Mcgrath, J. E., Turner, I. (2003) – Monitoring of a Multifunctional Submerged Geotextile Reef Breakwater, Gold Coast, Australia. In: *Proceedings 28th International Conference of Coastal Engineering*, Cardiff, pp. 1923-1935. [https://doi.org/10.1142/9789812791306\\_0162](https://doi.org/10.1142/9789812791306_0162)
- Kamphuis, J. W., Nairn, R. B. (1984) – Scale Effects in Large Coastal Mobile Bed Models. *Proceedings 19th International Conference on Coastal Engineering, Houston*, 2322–2338. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(86\)90036-0](https://doi.org/10.1016/0378-3839(86)90036-0)
- Kiran, A. S., Ravichandran, V., Sivakholundu, K. M. (2015) – Stability Analysis and Design of Offshore Submerged Breakwater Constructed Using Sand Filled Geosynthetic Tubes. In: *8th Proceedings International Conference on Asian and Pacific Coasts*, Procedia Engineering, 116:310–319. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.295>
- Kobayashi, N.; Meigs, L. E.; Ota, T.; Melby, J. A. (2007) – Irregular Breaking Wave Transmission over Submerged Porous Breakwater. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 133:104-116. Available on-line at [http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2007\)133%3A2\(104\)](http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)0733-950X(2007)133%3A2(104))
- Longuet-Higgins, M. S.; Stewart, R. W. (1964) – Radiation stresses in water waves; a physical discussion, with applications. *Deep-Sea Research*, 11:529-562. [https://doi.org/10.1016/0011-7471\(64\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0011-7471(64)90001-4)
- Losada, I. J., Silva, R., Imada, M. A. (1996) – 3-D non-breaking regular wave interaction with submerged breakwaters. *Coastal Engineering*, 28:229-248. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(96\)00019-1](https://doi.org/10.1016/0378-3839(96)00019-1)
- Medeiros, N.; Dias, M. S.; Neto, A. A.; Muehe, D. (2014) – Mapeamento Acústico de Areias Submersas para Recuperação de Praias do Rio de Janeiro, Brasil. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, 14:149-158. <https://doi.org/10.5894/rgci429>
- Metallinos, A. S.; Repousis, E. G.; Memos, C. D. (2016) - Wave Propagation Over a Submerged Porous Breakwater with Steep Slopes. *Ocean Engineering*, 111:424–438. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.11.015>
- Mosquera, R.; pedocchi, F. (2013) – Decomposition of Incident and Reflected Surface Waves Using an Ultrasonic Velocity Profiler. *Coastal Engineering*, 71:52–59. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2012.08.002>
- Motta, V. F. (1985) – Modelos Costeiros de Fundo Móvel. *Revista Brasileira de Fundo Móvel*, Rio de Janeiro, 238p.
- Muehe, D. (2010) – Brazilian Coastal Vulnerability to Climate Change. *Pan-American Journal of Aqua Science*, 5(2):173–183. Available on-line at [http://www.panamjas.org/pdf\\_artigos/PANAMJAS\\_5\(2\)\\_173-183.pdf](http://www.panamjas.org/pdf_artigos/PANAMJAS_5(2)_173-183.pdf)
- Nemes, D. D. (2016) – Variabilidade Morfodinâmica de uma Praia Intermediária com a Presença de um Afloramento Rochoso Submerso. 244p. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Unpublished. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27454.08006>.
- Neves, C. F., Muehe, D. (2008) – Vulnerabilidade, impactos e adaptação a mudanças do clima: a zona costeira, In: *Parcerias Estratégicas*, n.27, Brasília, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos: Ministério da Ciência e Tecnologia, pp.217-295. Available on-line at [http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias\\_estrategicas/article/view/325](http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/325)
- Neves, L.; Moreira, A.; Taveira-Pinto, F.; Lopes, M. L.; Veloso-Gomes, F. (2015) – Performance of submerged nearshore sand-filled geosystems for coastal protection. *Coastal Engineering*, 95:147–159. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2014.10.005>.
- Nielsen, P., 1992, “Coastal Bottom Boundary Layers and Sediment Transport”, *Advanced Series on Ocean Engineering*, v.4. World Scientific, Singapore.
- Nielsen, P. (2006) – Sheet Flow Sediment Transport Under Waves With Acceleration Skewness and Boundary Layer Streaming. *Coastal Engineering*, 53(9):749-758. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2006.03.006>.
- Nishihata, T.; Tajima, Y.; Sato, S. (2012) – Numerical Analysis of Wave and Nearshore Current Fields Around Low-Crested Permeable Detached Breakwaters. In: *Proceedings of 33th Conference on Coastal Engineering, Santander*, pp.1-10. Available on-line at <https://journals.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/6801>.
- Noda, E. K. (1978) – Scale Relations for Equilibrium Profiles. In: *Proceedings 16th Coastal Engineering Conference*, ASCE, 2:1531-1541. Available on-line at <https://icce-ojs-tamu.tdl.org/icce/index.php/icce/article/view/3353>
- Paul, M. J.; Kamphuis, J. W.; Brebner, A. (1972) – Similarity of Equilibrium Beach Profiles. *Coastal Engineering*, (13):1217-1236. Available on-line at <https://doi.org/10.9753/icce.v13.%25p>.
- Pilarczyk, K. W. (2003) – Design of Low-Crested (Submerged) Structures – An Overview. In: *Proceedings 6th International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries*, Colombo, 19p. Available on-line at <http://www.artificialreefs.org/ScientificReports/DesignLowCrestedStructures.pdf>
- Pilkey, O. H.; Neal, W. J.; Kelley, J. T.; Cooper, J. A. G. (2011) - Beaches of The World. In: Pilkey, O. H.; Neal, W. J.; Kelley, J. T.; Cooper, J. A. G. (eds.). *The World's Beaches: A Global Guide to the Science of the Shoreline*, University of California Press, Berkeley, California: 302p. ISBN-13: 978-0520268722
- Ranasinghe, R.; Turner, I.; Symonds, G. (2006) – Shoreline Response to Submerged Structures: a Numerical and Physical Modeling. *Coastal Engineering Journal*, 53:589–611. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.004>
- Ranieri, G. (2007) – The Surf Zone Distortion of Beach Profiles in Small-Scale Coastal Models. *Journal of Hydraulic Research*, 45(2): 261–269. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2007.9521761>
- Van Rijn, L. C. (1993) – Fluid Velocity and Bed Shear Stress. In: Rijn, L. C. V. (ed.), *Principles of sediment transport in rivers-estuaries and coastal seas*, pp.2.1-2.48. Aqua Publications, Amsterdam, Netherlands. ISBN: 90-800356-2-9.

- Van Rijn, L. C. (2011) – Coastal Erosion and Control. *Ocean & Coastal Management*, 54:867-887. <http://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2011.05.004>.
- Van Rijn, L. C., Tonnon, P. K., Sánchez-Arcilla, A., Cáceres, I., Grüne, J. (2011) – Scaling laws for beach and dune erosion processes. *Coastal Engineering*, 58:623–636. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.01.008>
- Short, A. D. (1999) – Beaches. In: Short, A. D. (Ed.), *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*, p.3-17, 1999. ISBN: 0 471 96570 7
- Short, A. D.; Klein, A. H. F. (2016) – Brazilian Beach Systems: Introduction. In: Short, A. D., Klein, A. H. F. (eds.). *Brazilian Beach System*, Coastal Research Library, 17:1-35. ISBN 978-3-319-30392-5.
- Smith, E. R.; Wang, P.; Zhang, J. (2003) – Evaluation of the CERC Formula Using Large-Scale Model Data. *Coastal and Hydraulics Laboratory - Engineer Research and Development Center Waterways Experiment Station - Vicksburg, Mississippi*, 14p. Available on-line at [http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1238&context=gly\\_facpub](http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1238&context=gly_facpub)
- Spielmann, K.; Certain, R.; Astruc, D.; Barousseau, J. P. (2011) – Analysis of submerged bar nourishment strategies in a wave-dominated environment using a 2DV process-based model. *Coastal Engineering*, 58:767–778. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2011.03.015>.
- Stauble, D. K.; Tabar, J. R. (2003) – The Use of Submerged Narrow-Crested Breakwaters for Shoreline Erosion Control. *Journal of Coastal Research*, 19: 684-722. Available on-line at [https://www.jstor.org/stable/4299207?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/4299207?seq=1#page_scan_tab_contents)
- Sumer, B. M.; Whitehouse, R. J. S.; Tørum, A. (2001) – Scour Around Coastal Structures: a Summary of Recent Research. *Coastal Engineering*, 44(2):153– 190. [http://doi.org/10.1016/S0378-3839\(01\)00024-2](http://doi.org/10.1016/S0378-3839(01)00024-2).
- Sumer, M. B. E.; Fredsoe, J. (2012) – Scour around breakwaters. In: *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Science, 17, Singapore. ISBN: 978-981-02-4930-4.
- Ting, C. L.; Lin, M. C.; Cheng, C. Y. (2004) – Porosity Effects on Non-Breaking Surface Waves Over Permeable Submerged Breakwaters. *Coastal Engineering*, 50:213–224. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2003.10.003>
- Ting, F. C. K.; Kirby, J. T. (1994) – Observation of Undertow and Turbulence in a Laboratory Surf Zone. *Coastal Engineering*, 24:51-80. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)90026-4](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)90026-4).
- Ting, F. C. K.; Kirby, J. T. (1995) – Dynamics of Surf-Zone Turbulence in a Strong Plunging Breaker. *Coastal Engineering*, 24:177-204. [https://doi.org/10.1016/0378-3839\(94\)00036-W](https://doi.org/10.1016/0378-3839(94)00036-W)
- Turner, I. L., Leyden, V. M., Cox, R. J. Jackson, L. A., Mcgrath, J. E. (2001) – Physical Model Study of the Gold Coast Artificial Reef. *Journal of Coastal Research*, Special Issue, 29:131-146. Available on-line at [https://www.jstor.org/stable/25736211?seq=1#page\\_scan\\_tab\\_contents](https://www.jstor.org/stable/25736211?seq=1#page_scan_tab_contents)
- Wang, P.; Kraus, N. C. (2005) – Beach Profile Equilibrium and Patterns of Wave Decay and Energy Dissipation across the Surf Zone Elucidated in a Large-Scale Laboratory Experiment. *Journal of Coastal Research*, 21:522–534. <http://dx.doi.org/10.2112/03-003.1>
- Wang, P.; Ebersole, B. A.; Smith, E. R.; Johnson, B. D. (2002) – Temporal and spatial variations of surf-zone currents and suspended sediment concentration. *Coastal Engineering*, 46:175–211. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839\(02\)00091-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3839(02)00091-1).
- Wright, L. D.; Guza, R. T.; Short, A. D. (1982) – Dynamics of a High-Energy Dissipative Surf Zone. *Marine Geology*, 45:41-62. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(82\)90179-7](https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90179-7).
- Wright, T. D.; Short, A. D. (1984) – Morfodinâmica Variability of Surf Zones and Beach: A Synthesis. *Marine Geology*, 56:93–118. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-8](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-8).
- Wu, Y. T.; Hsiao, S. C. (2013) – Propagation of Solitary Waves Over a Submerged Permeable Breakwater. *Coastal Engineering*, 81:1–18. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.06.005>.
- Wu, Y. T.; Yeh, C. L.; Hsiao, S. C. (2014) – Three-dimensional numerical simulation on the interaction of solitary waves and porous breakwaters. *Coastal Engineering*, 85:12–29. <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.12.003>.
- Yang, S. L. (2011) – 50,000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta. *Global and Planetary Change*, 75:14-20. <http://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.09.006>.