



V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, 07 a 09 de Novembro de 2012

Estudo Numérico de uma Placa Submersa Vista como Quebra-Mar e
Conversor de Energia das Ondas

Flávio Medeiros Seibt¹, Eduardo Costa Couto², Paulo Roberto de Freitas Teixeira³
Elizaldo Domingues dos Santos⁴, Liércio André Isoldi⁵

Universidade Federal do Rio Grande
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica
Avenida Itália, km 8, CP. 474, Rio Grande, RS, Brasil

¹e-mail: fseibt@gmail.com

²e-mail: e.c.couto@uol.com.br

³e-mail: pauloteixeira@furg.br

⁴e-mail: elizaldosantos@furg.br

⁵e-mail: liercioisoldi@furg.br

RESUMO

A crescente pesquisa por fontes de energia limpa e renovável tem contribuído para dar relevância ao estudo da energia das ondas do mar. Este artigo apresenta um modelo computacional desenvolvido para analisar o dispositivo placa submersa utilizado como quebra-mar e como conversor de energia das ondas do mar em energia elétrica. A dupla função deste dispositivo o distingue dos demais conversores de energia das ondas. O modelo desenvolvido utiliza os códigos comerciais GAMBIT e FLUENT. Neste último, a metodologia usada para representar a interação ar-água nas simulações numéricas do dispositivo é a multifásica Volume de Fluido. O objetivo deste artigo é contribuir para um maior conhecimento deste dispositivo analisando a influência do comprimento da placa no seu desempenho nas duas funções. Para tanto, o modelo desenvolvido, depois de validado, é aplicado em cinco simulações que se distinguem apenas pelo comprimento da placa. Nestas simulações, o seu desempenho na função de quebra-mar é quantificado por meio do coeficiente de transmissão. Já, o seu desempenho como conversor de energia é avaliado por sua eficiência em captar a energia das ondas incidentes. Constata-se que para um comprimento de placa, adimensionalizado pelo comprimento da onda, inferior à 0.83, as funções quebra-mar e conversor de energia não são concorrentes.

Palavras-chave: placa submersa, energia das ondas, ondas do mar, conversores de energia, FLUENT

1. INTRODUÇÃO

Os danos ao meio ambiente causados pela queima de combustíveis fósseis e o custo elevado decorrente da contínua busca por novas reservas têm estimulado a busca por fontes de energia limpa e renovável. A energia dos oceanos é um dos principais recursos renováveis do planeta. A parcela da energia dos oceanos que está associada ao movimento das partículas de água que ocorre na superfície das ondas e abaixo desta é denominada de energia das

ondas. Esta energia pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar, pois é esta que, pelo aquecimento desigual da superfície terrestre, é responsável pelos ventos que atuam na superfície dos oceanos gerando as ondas. A grandeza energia da onda é normalmente expressa como potência média por unidade de comprimento de frente de onda. Regiões consideradas boas para exploração da energia das ondas apresentam médias anuais que variam de 20 a 70 kW/m (Falcão, 2010) sendo que a média da região sul do Brasil é de 33 kW/m (Carnegie, 2012). O valor teórico de energia que pode ser captado das ondas, em todo o mundo, ao longo de um ano corresponde a 8×10^6 TWh, o que equivale à cem vezes a energia elétrica gerada pelas hidrelétricas de todo o planeta no mesmo período (Lagoun et al., 2010). Portanto, mesmo usando valores conservadores para a eficiência dos conversores de energia das ondas em energia elétrica, as perspectivas são boas o suficiente para estimularem pesquisas em tecnologias para o aproveitamento desta fonte de energia.

Em contraste com o que ocorre com a energia dos ventos, existem várias tecnologias para conversão da energia das ondas em energia elétrica. Diferentes critérios são utilizados para classificar os conversores, porém nenhum deles passa, ao contrário do que ocorre com tecnologias de extração de outras formas de energia renovável, pela potência dos dispositivos. Os critérios mais usuais são a posição relativa à superfície do oceano, a localização com relação à costa, o sistema de aproveitamento da energia das ondas ou princípio de conversão de energia (Chozas e Soerensen, 2009). Conforme este último critério, os conversores são classificados da seguinte forma: coluna de água oscilante, corpos flutuantes e galgamento (Cruz e Sarmiento, 2004). Atualmente, nenhum tipo de conversor ocupa uma posição de liderança do ponto de vista comercial e é esperado que os diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados conforme as características do local de instalação do conversor (Chozas e Soerensen, 2009).

O dispositivo placa submersa é um tipo de estrutura utilizada em engenharia costeira como quebra-mar ou conversor de energia das ondas (Brossard et al., 2009). Sobre este tipo de conversor existe pouca pesquisa, apesar do trabalho experimental de Ozer e Ozdamar (2007) mostrar que sua eficiência pode alcançar valores de até 60 %.

Quebra-mares são estruturas rígidas construídas paralelas ao litoral para, principalmente, criar condições de abrigo na entrada dos portos ou formar uma zona calma para refúgio de pequenas embarcações. Outras utilizações destas estruturas são a proteção costeira e a criação ou ampliação de área útil de praia para fins balneários (Pinto, 2001). Quando o objetivo é apenas reduzir a altura das ondas, são usados quebra-mares submersos que apresentam custos mais baixos, permitem a troca de água por cima deles e não interferem na paisagem. O dispositivo placa submersa proporciona uma proteção comparável à de um quebra-mar submerso convencional (Graw, 1998).

Naturalmente, a dupla função do dispositivo placa submersa gera a expectativa de que este dispositivo seja um conversor de energia economicamente viável. No entanto, ainda há muita pesquisa a ser realizada para tornar possível esta avaliação. Neste trabalho, foi realizada uma análise numérica da influência do comprimento da placa no seu desempenho nas duas funções. A influência na função de quebra-mar foi quantificada por meio do coeficiente de transmissão. Já, na função de conversor de energia, a eficiência do dispositivo foi usada para avaliar esta influência. Inicialmente foram validadas as metodologias utilizadas e, posteriormente, foram analisadas cinco situações que se distinguem apenas pelo comprimento da placa. Para tanto, foi usado o código computacional de dinâmica dos fluidos FLUENT (FLUENT, 2007), que é baseado no Método dos Volumes Finitos.

2. PLACA SUBMERSA

A história da utilização dos quebra-mares do tipo placa submersa como conversores de energia das ondas do mar em energia elétrica começa com testes realizados por Dick (1968) em um tanque de ondas com quebra-mares sólidos e submersos. A observação de um movimento orbital da água quando as ondas passavam sobre um quebra-mar poroso deu origem ao seguinte comentário: "Corantes inseridos durante alguns dos testes com quebra-mares permeáveis revelaram um padrão de circulação média. Medidas detalhadas não foram feitas, mas as linhas do caminho médio do corante são esquematizadas na Fig. 13.28." (Fig. 1).

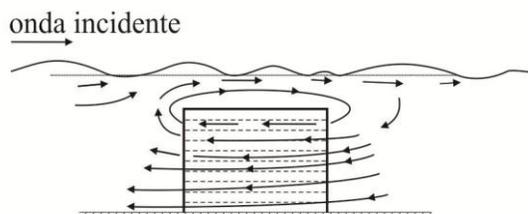


Figura 1: Movimento do fluido em quebra-mar poroso (Dick, 1968).

Anterior a ideia de sua utilização como conversor de energia, a placa submersa era vista apenas como um eficiente quebra-mar que permite a troca da água entre o mar aberto e a área protegida sem prejuízo à vista do mar aberto (Graw, 1993a). Estas boas características estimularam pesquisas sobre seu princípio de funcionamento. Graw (1992) justificou a maior eficiência deste quebra-mar com relação a outros quebra-mares submersos com o escoamento que ocorre sob a placa. Este escoamento, origem da ideia do conversor de energia, é descrito por Graw, neste mesmo trabalho, como um forte fluxo pulsante, com sentido contrário ao da propagação da onda, e que ocorre durante sua passagem. Segundo ele, este fluxo é bastante estável, pois não está sujeito a grandes alterações mesmo quando a região abaixo da placa é parcialmente fechada.

Ainda sobre o quebra-mar, Graw (1993a) compilou os resultados de várias investigações teóricas e experimentais com o objetivo de definir a influência do comprimento e da profundidade de submersão da placa na redução da altura da onda incidente. Todos os estudos analisados mostram uma forte dependência do coeficiente de transmissão com o comprimento relativo da placa (razão do comprimento da placa pelo comprimento da onda incidente). Alguns estudos ainda mostram as dependências com relação à profundidade relativa (razão da profundidade de submersão da placa pela profundidade do oceano) e com relação à razão da profundidade de submersão pela altura da onda incidente. As curvas apresentadas nesta compilação mostram como interagem os parâmetros estudados.

Em Graw (1993b,1994) encontram-se as primeiras referências sobre a placa submersa como um dispositivo que pode atuar como quebra-mar e conversor de energia das ondas. São apresentadas algumas vantagens deste dispositivo com relação a outros conversores: é totalmente submerso, portanto o impacto de grandes ondas é reduzido; pela mesma razão, problemas de corrosão na turbina também são reduzidos; como o fluxo sob a placa tem sempre o sentido contrário ao da propagação das ondas, uma turbina hidráulica comum pode ser utilizada, proporcionando uma redução de custos de implantação do sistema; a dupla utilização também contribui para esta redução de custos; se a turbina está captando energia, o sistema atua como filtro de ondas e conversor de energia, mas se a região abaixo da placa estiver completamente bloqueada, o sistema atua como um quebra-mar submerso convencional; como o dispositivo é totalmente submerso, a influência sobre o meio ambiente é reduzida.

Mesmo depois de Graw (1993b,1994) ter mostrado a placa submersa como um dispositivo de duplo propósito, ainda são realizadas pesquisas que a focalizam apenas como quebra-mar. Hsu e Wu (1999) desenvolveram um modelo numérico baseado na teoria linear de ondas e no método dos elementos de contorno para um sistema constituído por uma placa submersa, fixa, horizontal, impermeável e um quebra-mar submerso e permeável atuando em conjunto. Quando o quebra-mar é totalmente permeável, o sistema se reduz a uma placa submersa. Para esta situação, foram mostradas as comparações entre os resultados obtidos com o modelo e resultados experimentais e soluções numéricas da dependência do coeficiente de transmissão com relação ao comprimento relativo da placa. Hu et al. (2002) desenvolveram uma solução analítica para avaliar a transmissão e a reflexão de ondas lineares que se propagam por um sistema semelhante ao considerado por Hsu e Wu (1999). Para o caso em que o quebra-mar é considerado completamente permeável, são apresentadas as comparações com medições experimentais do coeficiente de reflexão traçado contra o comprimento relativo da placa. Brossard e Chagdali (2001) apresentaram um método experimental que utiliza duas sondas móveis para medir os coeficientes de reflexão e transmissão de uma placa submersa e relacionaram estes coeficientes com o número de onda para diferentes profundidades relativas da placa. Hildebrandt e Schlurmann (2008) realizaram experimentos em um tanque de ondas para analisarem o campo de velocidades no entorno de uma placa submersa e as forças nela induzidas pelo escoamento. Este trabalho teve por objetivo gerar dados para a validação de modelos numéricos.

Carter (2005) apresentou um minucioso histórico que aborda a placa como conversor de energia e como quebra-mar. Apresentou, também, um modelo numérico para a placa submersa que emprega o método dos elementos de contorno e a teoria potencial linear. Ao apresentar o campo de velocidades no entorno da placa, obtido por este modelo, contribuiu para o entendimento do fluxo que se desenvolve sob a placa decorrente da passagem das ondas e mostrou que o sentido deste fluxo alterna, ao contrário do descrito por Graw (1993a). Ozer e Ozdamar (2007) realizaram um estudo experimental para determinar a eficiência da placa submersa como conversor de energia. Ao descreverem o dispositivo, ao contrário de Graw (1993a), afirmaram que o fluxo sob a placa alterna o sentido. Por levarem em conta esta alternância de sentido, apresentaram a conveniência do uso de uma turbina que tenha a característica de girar sempre no mesmo sentido, qualquer que seja o sentido do fluxo. Desta forma, divergiram de Graw (1993c,1994), que, coerente à ideia de que o fluxo sob a placa mantém sempre o sentido contrário ao da propagação da onda, sugere o uso de uma turbina hidráulica convencional. Neste artigo de Ozer e Ozdamar são mostrados resultados de vários experimentos que visam permitir o cálculo da eficiência do dispositivo para oito configurações que incluem ou não a presença de obstruções abaixo placa. A eficiência máxima encontrada neste estudo foi de 60 %, enquanto que no estudo experimental de Graw (1995) foi de 3 %.

3. MODELO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE SIMULAÇÃO

O estudo de caso consiste em uma placa horizontal submersa colocada em um canal com um gerador de ondas em uma de suas extremidades (ver esquema da Fig. 2).

O modelo computacional desenvolvido para análise do dispositivo placa submersa utilizou os códigos comerciais GAMBIT (GAMBIT, 2006) e FLUENT (FLUENT, 2007). O primeiro foi usado para a discretização do domínio do problema por meio da construção de malhas estruturadas com elementos retangulares. O segundo disponibiliza modelos matemáticos para análise de problemas de dinâmica dos fluidos e transferência de calor e resolve numericamente as equações do modelo escolhido usando o Método dos Volumes Finitos. Especificamente para o estudo de caso, o FLUENT resolve as equações de conservação da massa e da quantidade de movimento.

O modelo numérico usa o método do Volume de Fluido para considerar o fluido multifásico que, neste caso, é composto por água e ar. Foi considerado o esquema de advecção *upwind* para tratamento dos termos advectivos, o método PRESTO! para a discretização espacial da pressão e o método GEO-RECONSTRUCTION para a reconstrução da interface dos fluidos. O algoritmo PISO (*Pressure-Implicit with Splitting of Operator*) foi usado como método de acoplamento pressão-velocidade. Foram empregados os fatores de sub-relaxação 0.3 e 0.7 para as equações da conservação da massa e quantidade de movimento, respectivamente.

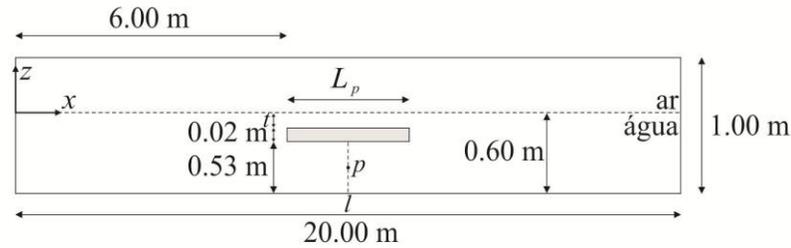


Figura 2: Geometria do canal e da placa.

As condições de contorno utilizadas foram: pressão atmosférica na face superior do canal; velocidade dependente do tempo na face esquerda do canal e, nas demais superfícies, condição de não deslizamento (Fig. 2).

As velocidades dependentes do tempo, nas direções x e z , utilizadas como condição de contorno na lateral esquerda do canal são obtidas da teoria de ondas de Stokes de 2º ordem e estão definidas pelas Equações (1) e (2) (Chakrabarti, 2005), respectivamente:

$$u(x, z, t) = \frac{\pi H}{T} \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \cos(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \frac{(\pi H)^2}{TL} \frac{\cosh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \cos 2(kx - \sigma t) \quad (1)$$

$$w(x, z, t) = \frac{\pi H}{T} \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \sin(kx - \sigma t) + \frac{3}{4} \frac{(\pi H)^2}{TL} \frac{\sinh 2k(h+z)}{\sinh^4 kh} \sin 2(kx - \sigma t) \quad (2)$$

onde H é a altura da onda, h é a profundidade, x é a posição, t representa o tempo e z é a posição com relação ao nível médio da superfície livre. $k = 2\pi/L$ e $\sigma = 2\pi/T$ são o número de onda e a frequência angular da onda, respectivamente, sendo L o comprimento da onda e T o período da onda.

Foram geradas seis malhas para o desenvolvimento deste trabalho. Com o intuito de evitar seis estudos de independência de malha, foram acolhidas as recomendações de Ramalhais (2011) referentes a discretização do domínio computacional, que demonstraram serem eficientes em estudos anteriores. Desta forma, as dimensões das células não ultrapassam $L/60$, na direção de propagação da onda, e $H/20$, na direção vertical, na região onde se manifesta a onda e no fundo do canal.

Todas as simulações referem-se a 20 s de escoamento e o passo de tempo usado sempre foi de 0.001 s.

4. VALIDAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

Orer e Ozdamar (2007) realizaram um estudo experimental com o objetivo de determinar a eficiência do conversor de energia das ondas do tipo placa submersa. Este estudo foi desenvolvido em um canal de ondas com a geometria mostrada na Fig. 2 e com o comprimento da placa (L_p) igualado a 1.00 m.

Neste trabalho experimental, com o objetivo de calcular a eficiência do conversor, foram medidas as velocidades máximas do escoamento sob a placa, no sentido contrário ao da propagação das ondas. Estas velocidades foram usadas na validação do modelo. A geometria do canal com a placa submersa usada nas simulações feitas para validar o modelo é a mesma do canal usado por Orer e Ozdamar (2007). Nestas simulações foi utilizada uma malha estruturada formada por 399800 elementos com dimensões adequadas aos critérios já expostos.

Antes da validação, os resultados do modelo numérico para a elevação da onda foram comparados com uma solução analítica. Para este fim, foi usada uma onda de altura (H) e período (T) iguais a 0.06 m e 1.50 s, respectivamente. A equação da dispersão da teoria linear fornece um comprimento de onda igual a 3.00 m, para estes

parâmetros de onda e a profundidade do canal igual a 0.60 m. Para este cenário, a melhor teoria para modelar a onda é a teoria de Stokes de 2ª ordem, conforme Chakrabarti (2005). Conforme esta teoria, a elevação da superfície livre (η) é obtida da Equação (3) (Chakrabarti, 2005).

$$\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) + \frac{\pi H^2}{8L} \frac{\cosh 2h}{\sinh^3 kh} (2 + \cosh 2kh) \cos 2(kx - \sigma t) \quad (3)$$

A Fig. 3 apresenta as soluções numérica e analítica para a posição $x = 5$ m.

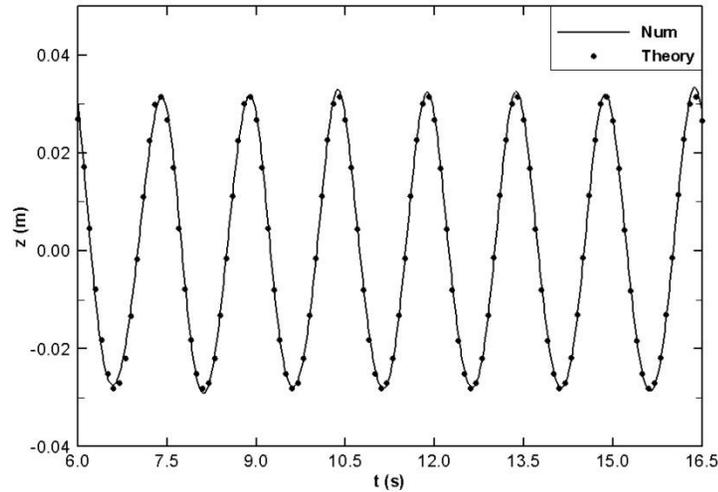


Figura 3: Comparação entre modelo numérico e teoria de Stokes de 2ª ordem.

A média quadrática das diferenças entre as curvas mostradas na Fig. 3 é inferior a 2 % para um intervalo correspondente à sete períodos, que inicia quando a onda já está plenamente formada e finda antes da onda refletida na face direita do canal atingir a posição onde foram realizadas as medidas. Este erro médio com valor pequeno e o fato das curvas estarem em fase mostram a boa capacidade do modelo em simular ondas.

Comprovada a capacidade do modelo em gerar ondas, foram selecionados dois experimentos do trabalho de Orer e Ozdamar (2007) para a validação. Nos experimentos e nas simulações correspondentes foram medidas as velocidades máximas do escoamento sob a placa no sentido contrário ao da propagação das ondas. As medições das velocidades foram realizadas em um ponto p localizado sob o centro da placa, a uma altura que corresponde à metade da altura da placa conforme a Fig. 2.

Os parâmetros da onda de cada experimento, as velocidades encontradas e os erros relativos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Parâmetros das ondas, resultado experimental, numérico e erro relativo.

Onda	T (s)	H (m)	Resultado experimental (cm/s)	Resultado numérico (cm/s)	Erro rel. (%)
1	1.50	0.06	-9.44	-8.34	11.67
2	1.87	0.06	-11.39	-12.72	-11.74

Os resultados experimentais apresentados na Tabela 1 são medições de velocidades feitas com um equipamento da marca japonesa Kenek, modelo Vm-801 H (Orer; Ozdamar, 2007), que apresenta uma precisão de $\pm 2\%$ ao longo da faixa $[0, \pm 200]$ cm/s (Kenek, 2012). Observa-se que a incerteza da medição depende de todos os equipamentos utilizados no sistema de medição.

5. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DO COMPRIMENTO DA PLACA NO DESEMPENHO DO DISPOSITIVO

Concluída a validação do modelo computacional e continuando a usar a onda de altura (H), comprimento (L) e período (T) iguais à 0.06 m, 3.00 m e 1.50 s, respectivamente, a influência do comprimento da placa no desempenho do dispositivo foi estudada por meio de cinco simulações. Nestas simulações, o comprimento da placa (L_p) assumiu os seguintes valores: 1.00 m, 1.50 m, 2.00 m, 2.50 m e 3.00 m, correspondentes às seguintes relações L_p/L : 0.33, 0.50, 0.67, 0.83 e 1.00, respectivamente.

Um quebra-mar submerso, como a placa horizontal em estudo, permite que as ondas provenientes do mar aberto passem por ele em direção à zona protegida. Sua eficácia é avaliada por sua capacidade de reduzir a altura da onda que chega na área a ser protegida. O parâmetro que expressa esta capacidade é o coeficiente de transmissão definido em Dean e Dalrymple (1991) como:

$$C_t = \frac{H_t}{H_i} \quad (4)$$

onde, H_t é a altura da onda transmitida e H_i é a altura da onda incidente. Desta forma, quanto menor o coeficiente de transmissão mais eficaz é o quebra-mar. A altura H_t foi medida a seis metros a jusante da placa, buscando evitar que as perturbações locais do escoamento próximo a placa influenciem nos resultados. A Fig. 4 representa a dependência deste coeficiente com relação ao comprimento da placa. Os resultados foram obtidos em um intervalo de tempo que inicia quando a onda já está plenamente formada no local de medição e finda antes que os efeitos de reflexão tanto do dispositivo quanto da parede do final do canal interfiram nos resultados.

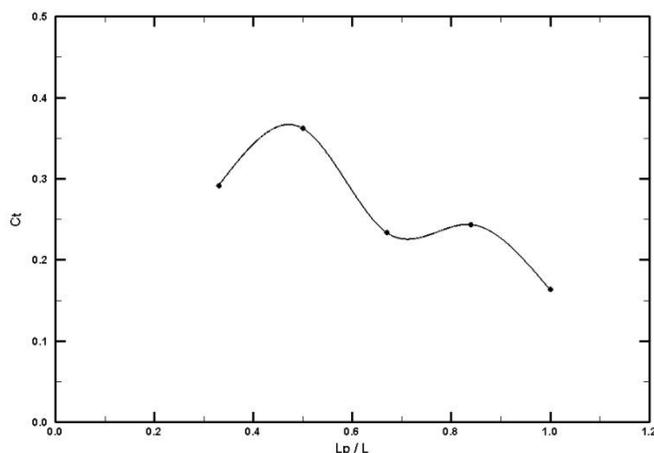


Figura 4: coeficiente de transmissão *versus* comprimento relativo da placa.

Observa-se, no âmbito deste estudo, uma tendência de redução do coeficiente de transmissão com o aumento do comprimento da placa. Embora se perceba esta tendência, existem algumas variações locais que indicam um coeficiente de transmissão máximo ($C_t = 0.36$) para $L_p/L = 0.50$ e não para uma relação de 0.33, enquanto que o C_t é mínimo ($C_t = 0.17$) para o maior comprimento de placa ensaiado ($L_p/L = 1.00$). Observa-se que os valores encontrados são da mesma ordem de grandeza dos resultados teóricos e experimentais arrolados por Graw (1993c).

Já, a aptidão da placa submersa como conversor de energia pode ser avaliada pela sua eficiência que pode ser calculada pela expressão proposta por Graw (1995):

$$\phi = \frac{\text{potência disponível sob a placa}}{\text{potência da onda}} = \frac{P_p}{P_w} \quad (5)$$

onde P_w , a potência da onda que incide no dispositivo, é obtida da expressão proposta por Dean e Dalrymple (1991),

$$P_w = \left(\frac{1}{8} \rho g H^2\right) \frac{\sigma}{k} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh}\right] \quad (6)$$

e P_p , a potência disponível sob a placa, é calculada de forma semelhante a proposta por Dizadji e Sajadian (2011),

$$P_p = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{-h+H_p} \left(P + \frac{1}{2} \rho u^2 \right) u \, dz \, dt \quad (7)$$

onde P é a pressão imposta pela onda (equivalente a pressão descontada da pressão hidrostática) e o segundo termo dentro do parênteses ($1/2\rho u^2$) equivale a pressão dinâmica. A Fig. 5 apresenta os valores da eficiência do dispositivo correspondentes aos comprimentos de placa estudados adimensionalizados pelo comprimento da onda.

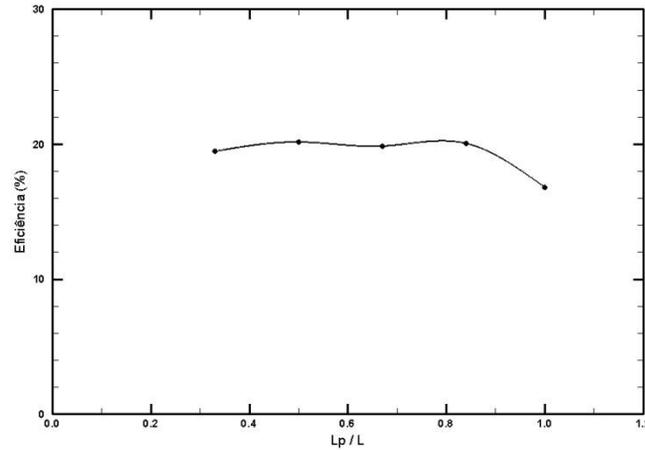


Figura 5: eficiência do conversor de energia das ondas do tipo placa submersa para diferentes comprimentos relativos de placa.

A curva apresentada na Fig. 5 mostra uma tendência de redução da eficiência com o aumento do comprimento relativo da placa, embora na faixa de L_p/L entre 0.33 e 0.83, a eficiência está próxima a 20 % com pequenas variações entre os resultados. Por outro lado, percebe-se um decréscimo mais acentuado da eficiência para $L_p/L = 1.00$, chegando a 16 %. Os valores de eficiência encontrados podem ser confrontados com os obtidos por Ozer e Ozdamar (2007) em sua investigação experimental. Nesta investigação, um caso com parâmetros semelhantes aos adotados neste estudo e L_p/L igual a 0.33 a eficiência obtida é 3 % aproximadamente. A diferença encontrada justifica-se pelo fato de que Ozer e Ozdamar consideraram apenas o termo da pressão dinâmica ($1/2\rho u^2$) na Eq. (7) para o cálculo da eficiência. Na análise dos comportamentos do fluxo de massa sob a placa e da velocidade máxima medida em um ponto médio sob o centro da placa (ponto p - Fig. 2) para cada caso, observou-se que ambos decrescem com o aumento do comprimento da placa, em conformidade com o comportamento da eficiência.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo foi desenvolvido um modelo numérico para análise do dispositivo placa submersa em um canal de 0.60 m de profundidade e sujeito a uma onda de $T = 1.5$ s e $H = 0.06$ m. Foram realizadas simulações que mostraram seu bom desempenho como quebra-mar e como conversor de energia das ondas. Estas simulações permitiram avaliar a influência do comprimento da placa no desempenho do dispositivo, indicando que quanto maior o comprimento, menores são a altura de onda transmitida e a eficiência. Observou-se que a função como quebra-mar do dispositivo é mais sensível a variação do comprimento da placa, uma vez que a eficiência do dispositivo permaneceu quase constante para uma ampla faixa de relação entre os comprimentos da placa e da onda de 0.33 a 0.83. No seguimento deste estudo, devem-se analisar o coeficiente de transmissão e a eficiência do dispositivo para faixas de comprimento da placa mais abrangentes. Também, é importante que sejam realizadas análises numéricas considerando a presença da turbina, a influência de outros parâmetros geométricos e utilizando uma modelagem tridimensional.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores deste artigo agradecem as bolsas concedidas pela CAPES (Projeto PNPd n° 23038.007758/2011-16) e CNPq (Projeto n° 555695/2010-7) especialmente ao Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha, coordenador deste último projeto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brossard, J., Chagdali, M., 2001. Experimental investigation of the harmonic generation by waves over a submerged plate, *Coastal Engineering*, 42 (1), 277-290.
- Brossard, J., Perret, G., Blonce, L. and Diedhiou, A., 2009. Higher harmonics induced by a submerged horizontal plate and a submerged rectangular step in a wave flume, *Coastal Engineering*, 56 (1), 11-22.
- Carter, R. W., 2005. Wave energy converters and a submerged horizontal plate, Thesis of Degree of Master of Science in Ocean and Resources Engineering, University of Hawai'i, Manoa, Honolulu, HI, USA, 273p.
- Carnegie. Disponível em: <<http://www.carnegiewave.com>>. Acesso em: 6 set. 2012.
- Chakrabarti, S. K., 2005. Handbook of Offshore Engineering, Vol. 1, 1st ed., Elsevier, 669p.
- Chozas, J. F. and Soerensen, H. C., 2009. State of the art of wave energy in Spain, Proc. 3rd Annual Electrical Power and Energy Conference (EPEC), Montreal, QC, Canada, IEEE, 1-6.
- Cruz, J. M. B. P. and Sarmento, A. J. N. A., 2004. Energia das ondas: Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais, Instituto do Ambiente, 65p.
- Dean, R. G. and Dalrymple, R. A., 1991. Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 355p.
- Dick, T. M., 1968. On solid and permeable submerged breakwaters, Ph.D. Dissertation, Dept. of Civil Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 128p.
- Dizadji, N. and Sajadian, S. E., 2011. Modeling and optimization of the chamber of OWC system, *Energy*, 36 (5), 2360-2366.
- Falcão, A. F. O., 2010. Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14 (3), 899-918.
- FLUENT (version 6.3.26), 2007, ANSYS, Inc..
- GAMBIT (version 2.4.6), 2006, ANSYS, Inc..
- Graw, K. U., 1992. The submerged plate as a wave filter: the stability of the pulsating flow phenomenon, Proc. 23rd International Conference on Coastal Engineering (ICCE), Venice, Italy, 1153-1160.
- Graw, K. U., 1993a. The submerged plate as a primary wave breaker, Proc. XXV International Association for Hydraulic Research (IAHR), Japan, 38-45.
- Graw, K. U., 1993b. Shore protection and electricity by submerged plate wave energy converter, Proc. European Wave Energy Symposium, Edinburgh, UK, 379-384.
- Graw, K. U., 1993c. The submerged plate wave energy converter: A new type of wave energy device, Proc. International Symposium on Ocean Energy Development (ODEC), Muroran, Hokkaido, Japan, 307-310.
- Graw, K. U., 1994. Is the submerged plate wave energy converter ready to act as a new coastal protection system?, Proc. XXIV Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Napoli, 1-9.
- Graw, K. U., 1995. Wellenenergie – eine hydromechanische Analyse, Bericht Nr. 8 des Lehr- und Forschungsgebietes Wasserbau und Wasserwirtschaft, Bergische Universitaet – Gesamthochschule, Wuppertal, Germany, 332p.
- Graw, K. U., 1998. Wave energy, need for protection – possible uses, Expo'98 - The Oceans, a Heritage for the Future, Universität Leipzig, Leipzig, 16p.
- Hsu, H. H., and Wu, Y. C., 1999. Scattering of Water Wave by a Submerged Horizontal Plate and a Submerged Permeable Breakwater. *Ocean Engineering*, 26 (4), 325-341.
- Hu, H., Wang, K. H., and Williams, A. N., 2002. Wave Motion Over a Breakwater System of a Horizontal Plate and a Vertical Porous Wall. *Ocean Engineering*, 29, 373-386.
- Hildebrandt, A. and Schlurmann, T., 2008. Velocity Field Under Propagating Waves Over a Submerged Horizontal Plate and Induced Forces. Proc. Chinese-German Joint Symposium on Hydraulic and Ocean Engineering, Darmstadt, 24-30.
- Kenek, Electromagnetic Current Meter. Retrieved March 15, 2012, from <http://www.hangilco.com/VM-801.htm>.
- Lagoun, M. S., Benalia, A. and Benbouzid, M. E. H., 2010. Ocean wave converters: State of the art and current status, Proc. International Energy Conference and Exhibition (EnergyCon 2010), Manama, Bahrain, IEEE, 636-641.
- Orer, G. and Ozdamar, A., 2007. An experimental study on the efficiency of the submerged plate wave energy converter, *Renewable Energy*, 32 (8), 1317-1327.
- Pinto, F. A. T. Análise das oscilações e dos campos de velocidades nas proximidades de quebra-mares submersos sob a agitação marítima. 2001. 315f. Dissertação para Doutorado em Engenharia Civil - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

9. AVISO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo material impresso incluído neste paper.