



VII SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA

Rio Grande, de 23 à 25 de Novembro de 2016

MODELAGEM FÍSICA DA VELOCIDADE DE DERIVA POR ONDAS DE GRAVIDADE REGULARES

Lenin Domingues Garcia¹, Eduardo Puhl¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)
Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH)
Núcleo de Estudos de Corrente de Densidade (NECOD)
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Agronomia, Porto Alegre - RS, Brasil
e-mail: lenindg@hotmail.com

RESUMO

As ondas marítimas possuem a particularidade de transportar matéria, além de energia. Trata-se de um conceito responsável por muitos estudos na área de hidráulica marítima. Um exemplo claro é o transporte de manchas de óleo e poluentes por vastas regiões oceânicas pela ação das ondas de gravidade. O presente estudo tem o objetivo de verificar a validade de modelo teórico para estimativa da velocidade de deriva de ondas de gravidade regulares através de modelagem física em canal fechado. Foi utilizado o Canal de Ondas do IPH, o qual possui batedor de ondas articulado e uma praia artificial na outra extremidade. O comprimento do canal atinge 42 m por 1 m de largura e 0,53 m de profundidade na seção de medição. O transporte de massa foi avaliado através da medição de perfis verticais da velocidade média temporal, os quais apresentaram um padrão de recirculação no canal: a região junto ao leito apresenta um transporte de massa em direção à praia, já a região superior apresenta um fluxo de retorno ao batedor. Os resultados apresentam boa similaridade com o modelo teórico na forma do perfil. Porém, nas camadas mais longe do leito e para ondas de maior período as discrepâncias foram superiores.

Palavras-chave: Ondas marítimas, velocidade de Stokes, ensaios de laboratório.

1. INTRODUÇÃO

As ondas de praia, ou ondas de gravidade, são classificadas como ondas mecânicas, que por definição necessitam de um meio material para efetuar sua propagação. Ao observar o mar na beira da praia, é possível identificar dois padrões de onda distintos: as de locais mais distantes – mar adentro – e as de rebentação, que se encontram mais próximas à orla. As ondas marítimas possuem a particularidade de transportar matéria, além de energia. Trata-se de um conceito responsável por muitos estudos na área de hidráulica marítima, um exemplo claro é o transporte de manchas de óleo e poluentes por regiões oceânicas pela ação das ondas de gravidade.

Para elucidar melhor o transporte de matéria pode-se imaginar uma garrafa boiando em alto mar, onde é possível observar um movimento orbital no corpo, ou seja, a garrafa sofre avanços e recuos periódicos, porém há uma resultante de deslocamento (Fig. 1) na direção de propagação da onda. Este deslocamento ocorre devido à velocidade de deriva (U), ou velocidade de Stokes, o qual foi o primeiro a equacionar o efeito não linear (Stokes, 1847) através da expressão:

$$U = \frac{a^2 \omega k}{2 \sinh^2 kd} [\cosh 2k(y + d)] \quad (1)$$

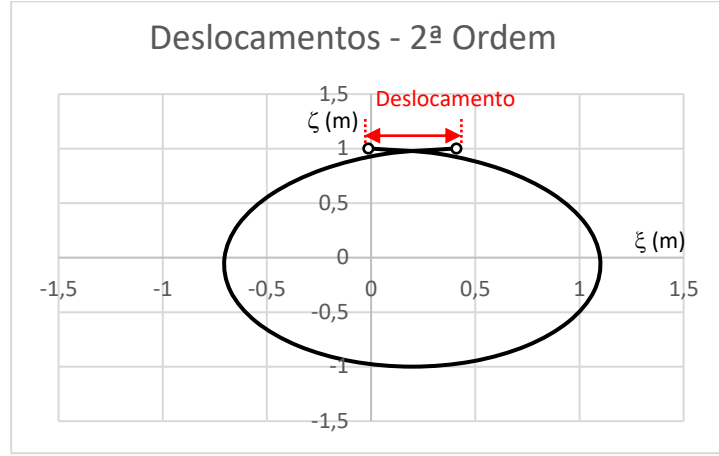


Figura 1 – Movimento orbital de uma partícula em um período de onda, destacando o deslocamento resultante do transporte de massa na direção de propagação da onda. No caso, ξ e ζ são os eixos horizontais e verticais, respectivamente. A onda se propaga em águas profundas ($d > L/2$), possui período de 8 segundos, altura de 2 metros, onde d é a profundidade e L é o comprimento da onda.

O efeito não-linear da velocidade de deriva tem grande importância no entendimento da circulação oceânica em fenômeno como: advecção de sedimentos em suspensão perto da costa, geração da circulação de Langmuir, transporte de plumas (fluviais, derramamento de óleo, emissários, etc) e objetos submersos (ovas de peixes, larvas, etc). Neste sentido, os modelos numéricos mais modernos de circulação oceânica buscam incorporar o efeito da velocidade de deriva.

No oceano, a velocidade de deriva não pode ser observada através de medições de velocidade em um ponto fixo, mas no caso de um canal fechado, um padrão de recirculação deve ser estabelecido pela continuidade do fluido. Deste modo, Longuet-Higgins (1953) desenvolver um modelo teórico para prever o padrão de recirculação dentro do canal considerando o efeito da viscosidade, mas considerando o escoamento não-turbulento. Além disso, o modelo leva em conta a razão entre a amplitude da onda (a) e a espessura da camada limite (δ). Quando a razão a/δ for grande, então o perfil de velocidade dentro do canal fechado é dito dependente das condições nos contornos, no caso, o gerador de ondas e a praia. Porém, no caso em que este razão é pequena, a solução para a velocidade de deriva é dada pela expressão abaixo:

$$U = \frac{a^2 \omega k}{2 \sinh^2 kd} \left[\cosh 2k(y + d) + \frac{3}{2} + \frac{kd}{2} \sinh \left(\frac{6ky^2}{d} + 8ky + 2kd \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\sinh 2kd}{2kd} + \frac{3}{2} \right) \left(\frac{y^2}{d^2} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

Onde $k = 2\pi/L$, $\omega = 2\pi/T$, $a = H/2$, d representa a profundidade da lâmina de água, y a posição vertical a partir da linha de água (positivo ascendente), o período é dado por T , a altura da onda por H e L representa o comprimento de onda. No caso da investigação deste transporte de massa em um ponto fixo no canal, o efeito resultante será observado através da velocidade média temporal (u_0). Como a velocidade de deriva de Stokes (Eq. 1) não pode ser observada em um ponto fixo, a expressão para a velocidade média temporal é dada (Bullock e Short, 1959) pela diferença entre a equação (2) e (1), ou seja:

$$u_0 = \frac{a^2 \omega k}{2 \sinh^2 kd} \left[\frac{3}{2} + \frac{kd}{2} \sinh \left(\frac{6ky^2}{d} + 8ky + 2kd \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\sinh 2kd}{2kd} + \frac{3}{2} \right) \left(\frac{y^2}{d^2} - 1 \right) \right] \quad (3)$$

Alguns estudos experimentais já foram realizados para investigar e validar os modelos teóricos de velocidade de deriva, assim como diferentes técnicas já foram utilizadas para estimar os valores de velocidade de deriva. O trabalho pioneiro de Russel e Osorio (1957) utilizou técnicas de rastreamento de partículas e verificou uma boa similaridade com o modelo teórico de Longuet-Higgins (1953) para o intervalo entre $0,7 > kd > 1,5$. Além disso, Bullock e Short (1985) realizaram medições de velocidade em um ponto fixo, porém observou que as condições de contorno são importantes para a estimativa do modelo teórico, o qual apresentou boa correlação. Recentemente, técnicas de PIV foram aplicadas por Umeyama (2012) e Paprota et al. (2016) para estimativa da velocidade de deriva, os quais apontam valores superestimados pelo modelo teórico.

Neste sentido, o presente estudo tem o objetivo de verificar a validade do modelo teórico de Longuet-Higgins (1953) para estimativa da velocidade de deriva de ondas de gravidade regulares. Para tanto, através de modelagem física em canal fechado, foram realizadas medições do perfil vertical de velocidade média temporal a fim de verificar o padrão de recirculação estabelecido.

2. MÉTODOS E ENSAIOS

Para a realização dos experimentos foi utilizado o Canal de ondas do IPH/NECOD, esboçado na Fig. 2, conforme metodologia apresentada em Rosauo (2004). O canal é dotado de um gerador de onda regular articulado e possui um comprimento de 43 m e 1 m de largura, sendo que na outra extremidade há uma praia dissipativa de enrocamento (1:2). O canal possui um degrau a 14,4 m do bater de ondas, o qual causa uma redução de profundidade de 0,47 m.

Um medidor acústico de velocidades por efeito Doppler (ADV) foi posicionado a uma distância de 11,0 m da praia, conforme ilustra a Fig.2. O instrumento coleta dados de velocidade em três diferentes direções: transversal, longitudinal e vertical ao eixo do canal. Um dispositivo manual mecânico permitia o deslocamento vertical do ADV, a fim de realizar a medição de uma série temporal de velocidades em diferentes pontos no eixo vertical. A posição de medição foi determinada utilizando o próprio sensor acústico do instrumento que registra a distância da ponta do instrumento até o leito. Em cada série temporal o ADV fez o registro de 4096 amostras a uma frequência de 20 Hz. A partir desta série temporal, determinou-se a velocidade média temporal (u_0) na direção longitudinal ao canal, associada a uma posição vertical (y). Finalmente, os perfis verticais da velocidade média temporal do tipo (u_0, y) foram determinados.

Quatro ensaios foram realizados, conforme evidenciado na Tab. 1, todos com a mesma profundidade na seção de medição de 0,28 m. Os dados de altura de onda (H) foram obtidos a partir da curva de calibração do bater de ondas realizado por Clemente (2013), a partir da frequência e do curso do gerador de ondas para cada ensaio. Os experimentos consistiram de ensaios de longa duração a fim de permitir o estabelecimento do padrão de recirculação no canal, portanto o início das medições pelos instrumentos foi realizado depois de passados, pelo menos, 15 minutos do início da incidência das ondas.

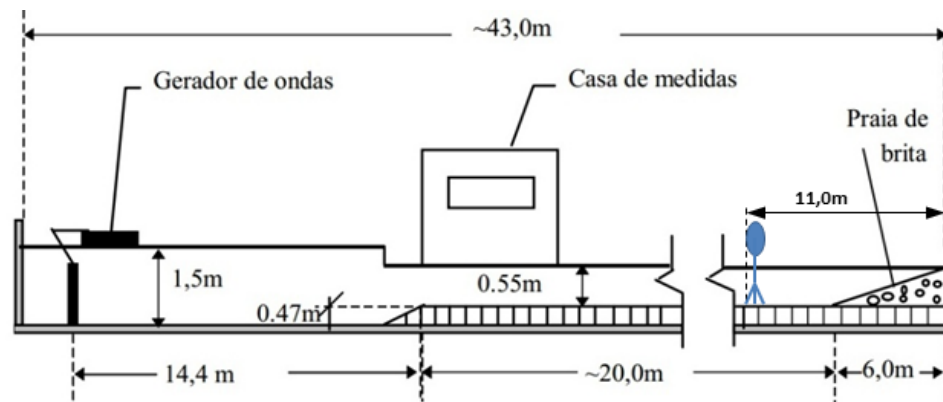


Figura 2 – Diagrama esquemático do Canal de Ondas do IPH/NECOD, destacando o posicionamento dos instrumentos de medição.

Tabela 1. Períodos e Alturas de onda em seus respectivos ensaios.

Ensaio	d (m)	T (s)	H (m)
1	0,28	1,22	0,094
2		1,39	0,078
3		1,54	0,065
4		1,85	0,043

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após o processamento dos dados, foi quantificado o transporte de massa devido às ondas e analisado os padrões de circulação no canal do IPH. A Figura 4 apresenta os perfis verticais de velocidade média temporal (u_0, y) obtidos para os quatro ensaios realizados. No gráfico, os valores positivos de velocidade média u_0 indicam um transporte na direção de propagação das ondas, ou seja, em direção à praia. Ao contrário, valores negativos de u_0 indicam um transporte na direção contrária à propagação das ondas, ou seja, em direção ao bater de ondas. Através da Fig. 4 pode-se observar que quanto menor o período da onda, maior tende a ser a recirculação e, também, a altura das ondas geradas no canal. Além disso, podemos verificar que em todos os ensaios realizados apresentaram um mesmo padrão de recirculação: a região junto ao fundo apresenta um transporte de massa em direção à praia, já a região superior apresenta um fluxo de retorno ao bater. Devido às limitações físicas do ADV, que realiza medições em um volume a 5 cm a partir da ponta do instrumento, não foi possível caracterizar a região próxima à superfície livre. Porém, pode-se notar uma tendência de decaimento da velocidade média em direção à fronteira superior.

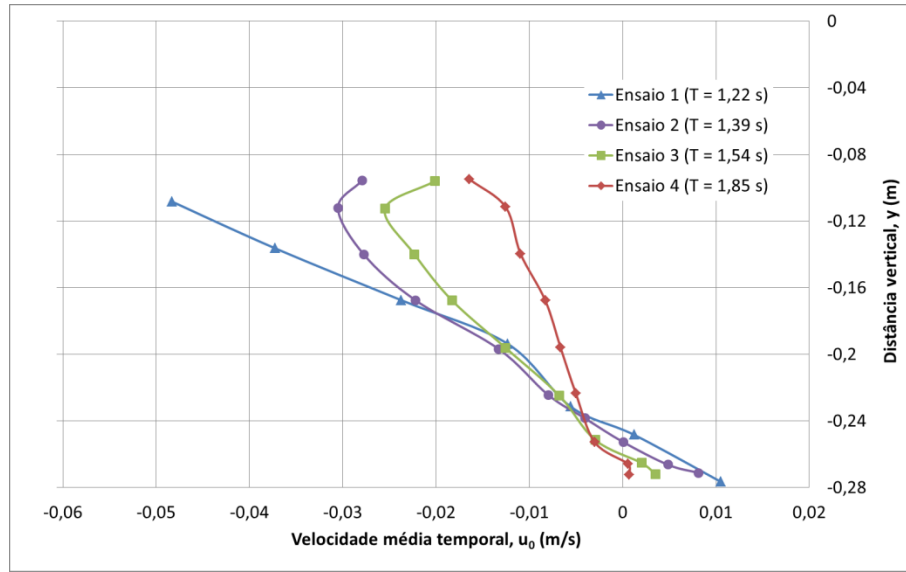


Figura 4 – Perfis verticais de velocidade média temporal resultantes dos experimentos.

Nos gráficos abaixo (Figs. 5 a 8) os perfis de velocidade medidos foram comparados com a equação teórica (Eq. 3) prevista por Longuet-Higgins (1953) na forma adimensionalizada, na qual relaciona as seguintes grandezas:

$$\left(-\frac{y}{d}\right) \times \left(\frac{u_0}{a^2 \omega k}\right) \quad (4)$$

Onde d é a profundidade, a é a amplitude da onda, ω é a frequência angular, k é o número de onda.

Para todos os ensaios, a forma do perfil teórico é muito próxima a forma aproximada dos dados medidos. Além disso, há uma boa concordância dos dados medidos com o modelo teórico. Porém, observa-se que para os ensaios com maior período, a discrepância com os dados medidos é acentuada. Este fato pode estar associado à maior reflexão junto à praia pelas ondas de maior período, as quais possuem menor esbeltez (H/L).

Junto da camada limite, apesar da direção do transporte ter sido bem prevista pelo modelo, este parece superestimar sua magnitude. Estas discrepâncias podem ser explicadas pelas considerações do modelo teórico, principalmente quanto ao regime de escoamento.

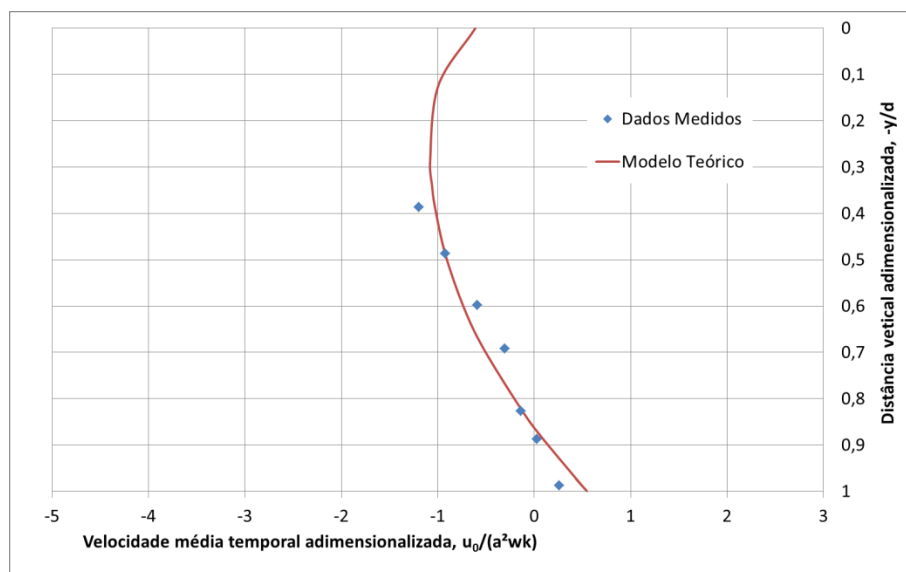


Figura 5 – Comparação entre o modelo teórico e os dados medidos do perfil vertical da velocidade média temporal adimensionalizada no caso do Ensaio 1 com $T = 1,22$ s e $H = 0,094$ m.

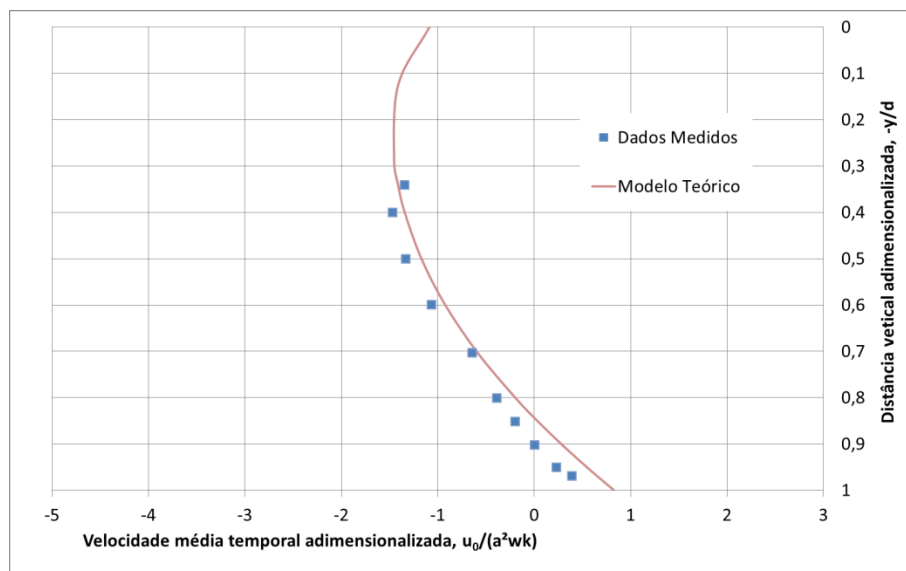


Figura 6 – Comparação entre o modelo teórico e os dados medidos do perfil vertical da velocidade média temporal adimensionalizada no caso do Ensaio 2 com $T = 1,39$ s e $H = 0,078$ m.

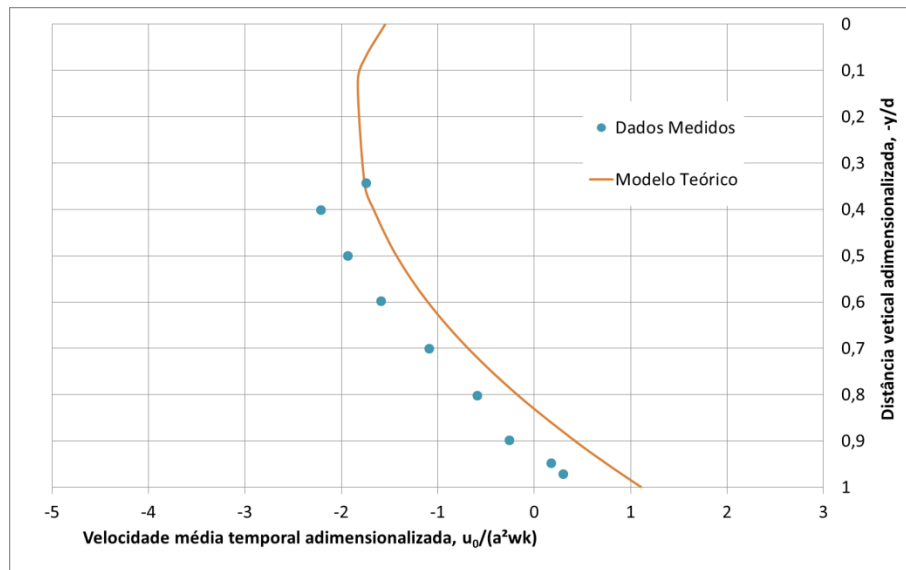


Figura 7 – Comparação entre o modelo teórico e os dados medidos do perfil vertical da velocidade média temporal adimensionalizada no caso do Ensaio 3 com $T = 1,54$ s e $H = 0,065$ m.

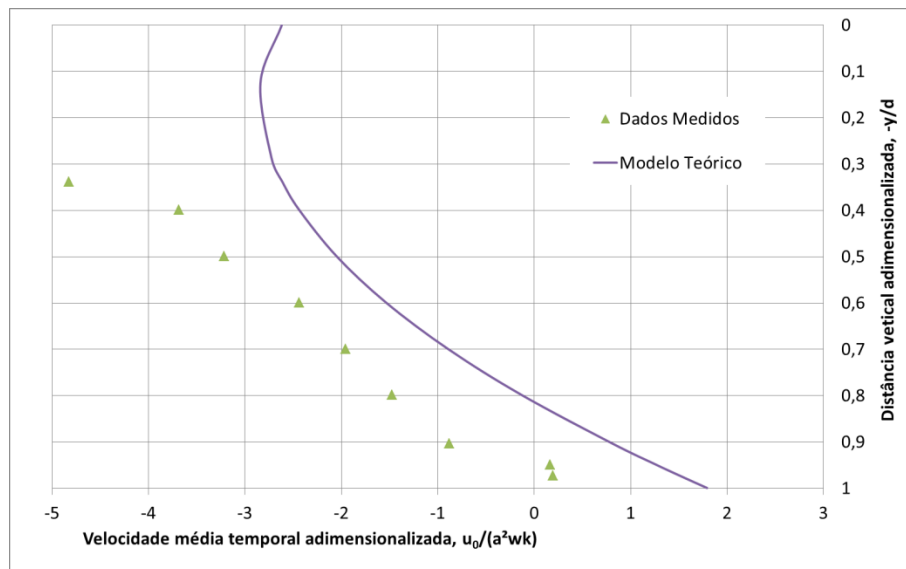


Figura 8 – Comparação entre o modelo teórico e os dados medidos do perfil vertical da velocidade média temporal adimensionalizada no caso do Ensaio 4 com $T = 1,85$ s e $H = 0,043$ m.

4. CONCLUSÃO

O trabalho apresenta resultados experimentais em laboratório para determinação dos padrões de recirculação das ondas em canal de ondas fechado. O modelo teórico de Longuet-Higgins (1953) foi comparado com os dados experimentais através da medição dos perfis verticais da velocidade média temporal.

A partir das análises foi possível identificar em todos os casos simulados o mesmo padrão de recirculação: uma corrente em direção à praia junto ao fundo e uma corrente de retorno junto à superfície. Os resultados apresentam boa similaridade com o modelo teórico na forma do perfil. Porém, nas camadas mais longe do leito e para ondas de maior período as discrepâncias foram superiores. Estima-se que a reflexão junto à praia seja responsável pela maior diferença nos valores entre os dados medidos e o modelo teórico. Na continuidade dos trabalhos, recomenda-se quantificar os coeficientes de reflexão associados aos experimentos realizados a fim de incorporar na estimativa da velocidade de deriva. Finalmente, os métodos utilizados se mostraram adequados, permitem esboçar claramente a

recirculação que ocorre no canal, simulando e quantificando a circulação oceânica, auxiliando e contribuindo para novos estudos de caso.

5. REFERÊNCIAS

- Bullock, G.N. and Short, I., 1985. "Water Particle Velocities in Regular Waves". *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, Vol. 111, No. 2.
- Clemente, D.S., 2013. *Energia das Ondas: Metodologia de Ensaio em Modelos Reduzidos*. Master thesis, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.
- Longuet-Higgins, M. S., 1953. "Mass transport in water waves". *Philosophical Transactions of the Royal Society London Series A-Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 245, pp. 535–581
- Paprot, M., Sulisz, W. and Reda, A., 2016 "Experimental study of wave-induced mass transport". *Journal of Hydraulic Research*, vol. 54, n. 4, pp. 423-434, DOI:10.1080/00221686.2016.1168490.
- Rosauro, N.M.L., 2004. "Teoria e Prática da Geração e Propagação de Ondas Monocromáticas em um Canal de Laboratório". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 9. No. 1.
- Russel, R. C. H., and Osorio, J. D. C., 1957. "An experimental investigation of drift profile in a closed channel". *Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Engineering*, New York, ASCE, 293–305.
- Stokes, G. G., 1847. "On the theory of oscillatory waves". *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, vol. 8, pp. 441–455.
- Umeyama, M., 2012. "Eulerian-Lagrangian analysis for particle velocities and trajectories in a pure wave motion using particle image velocimetry". *Philosophical Transactions of the Royal Society A-Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 370, pp. 1687–1702.