

## MODELAGEM FÍSICA DA VELOCIDADE DE DERIVA POR ONDAS DE GRAVIDADE REGULARES PHYSICAL MODELING OF STOKES DRIFT VELOCITY BY REGULAR GRAVITY WAVES

Lenin Domingues Garcia<sup>1</sup>

Eduardo Puhl<sup>2</sup>

**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 em uma das extremidades e uma praia artificial na outra. 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 analisado: a região junto ao leito apresenta um transporte de massa em direção à praia, já a região superior apresenta um fluxo de retorno ao gerador de ondas. Os resultados apresentam boa similaridade com o modelo teórico na forma do perfil. Porém, as discrepâncias foram maiores tanto para as camadas mais longe do leito quanto para ondas de maior período.

**Palavras-chave:** Ondas marítimas, Velocidade de Stokes, Ensaio de laboratório, Modelagem física.

**Abstract:** The waves of the ocean have the peculiarity of carry matter, besides energy. This is a key concept for many studies in the field of coastal hydraulics. A clear example is the transport of oil spills and pollutants across vast oceanic regions by the action of gravity waves. The present study has the aim of check the validity of a theoretical model to estimate the drift velocity of regular gravity waves through the use of physical modeling in closed channel. The wave channel used in the experiments had a flap-type wave generator at one end and an artificial dissipative beach at the other end. The channel is 42.0 m long, 1.0 m wide and 0.53 m deep at the test section. The mass transport was evaluated by the measurement of vertical profiles of timed average velocity, which presented a recirculation pattern at the analyzed channel. The region close to the bed presented a mass transport towards the beach, while the upper region presented a return flow to the wave generator. The results had good similarity with the theoretical model according to the profile shape. However, the discrepancies were higher either for larger distances of the bed as well as for waves of longer period.

**Keywords:** Ocean waves, Stokes drift velocity, Laboratory tests, Physical modeling.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Hídrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), [lenindg@hotmail.com](mailto:lenindg@hotmail.com).

<sup>2</sup> Professor Adjunto, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), [eduardo.puhl@ufrgs.br](mailto:eduardo.puhl@ufrgs.br).

# 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, ilustrada na Figura 1, na direção de propagação da onda.

Este deslocamento ocorre devido à velocidade de deriva ( $U$ ), ou velocidade de Stokes, o matemático e físico irlandês foi o primeiro a equacionar o efeito não linear (STOKES, 1847) através da Equação 1, representada abaixo:

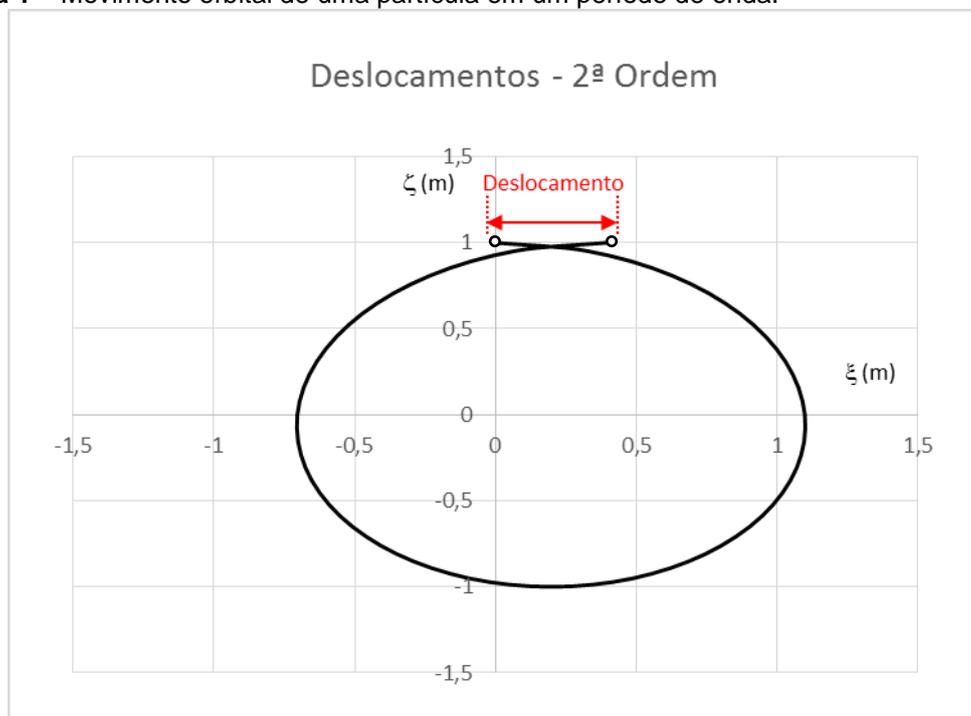
$$U = \frac{a^2 \omega k}{2 \sinh^2 kd} [\cosh 2k(y + d)] \quad (1)$$

A Figura 1 destaca o deslocamento resultante do transporte de massa na direção de propagação da onda, trata-se do movimento orbital de uma partícula no decorrer de um período de onda. No caso,  $\xi$  e  $\zeta$  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 fenômenos 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.

**Figura 1** – Movimento orbital de uma partícula em um período de onda.



**Fonte:** AUTORES.

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) desenvolveu um modelo teórico para prever o padrão de recirculação no interior do canal considerando o efeito da viscosidade e o escoamento não-turbulento. Além disso, o modelo leva em conta a razão entre a amplitude da onda ( $\alpha$ ) e a espessura da camada limite ( $\delta$ )

Quando a razão ( $\alpha/\delta$ ) 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 esta razão é pequena, a solução para a velocidade de deriva é dada pela Equação 2, expressada abaixo:

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

Onde:  $k=2\pi/L$ ,  $\omega=2\pi/T$  e  $\alpha=H/2$ ; sendo  $d$  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, esboçada na Equação 1, não pode ser observada em um ponto fixo, a expressão para a velocidade média temporal é dada (BULLOCK e SHORT, 1985) pela diferença entre a equação (2) e (1), representada abaixo pela Equação 3, resultando em:

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

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 seus valores aproximados. 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, entretanto, observou-se 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, que tenderam a apontar 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, além de caracterizar o padrão de recirculação estabelecido no canal em laboratório. Para tanto serão realizadas

medições do perfil vertical de velocidade média temporal através de modelagem física em canal fechado.

## 2 DESENVOLVIMENTO

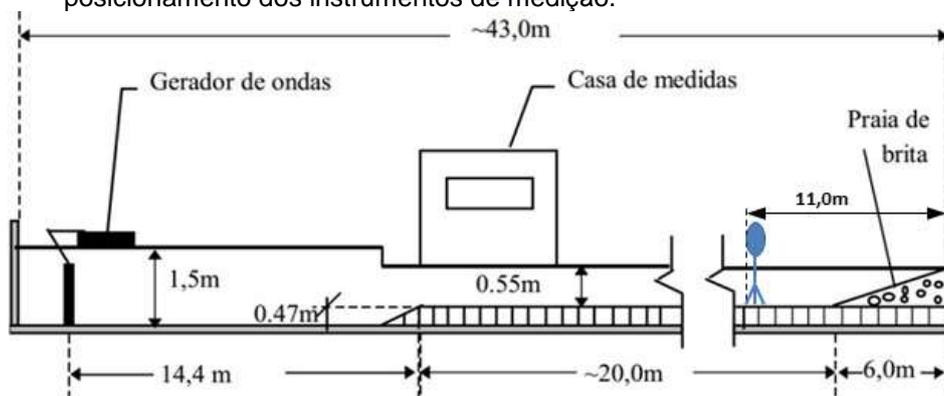
Para a realização dos experimentos foi utilizado o canal de ondas do IPH, esboçado na Figura 2, conforme metodologia apresentada em Rosauero (2004). O canal é dotado de um gerador de ondas regular articulado e possui um comprimento de 43 m e 1 m de largura, sendo que na extremidade oposta há uma praia dissipativa de enrocamento (1:2). O canal possui um degrau a 14,4 m do batedor de ondas, que 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 Figura 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 ponto de medição, o registro consistia de uma série temporal de 4096 amostras adquiridas a uma frequência de 20 Hz. A partir desta série temporal, determinou-se a velocidade média temporal ( $u_o$ ) na direção longitudinal ao canal, associada a uma posição vertical ( $y$ ). Finalmente, os perfis verticais da velocidade média temporal do tipo ( $u_o, y$ ) foram determinados.

Quatro ensaios foram realizados, conforme evidenciado na Tabela 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 batedor 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.



Fonte: Modificado de Nara (2004).

**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

Fonte: AUTORES.

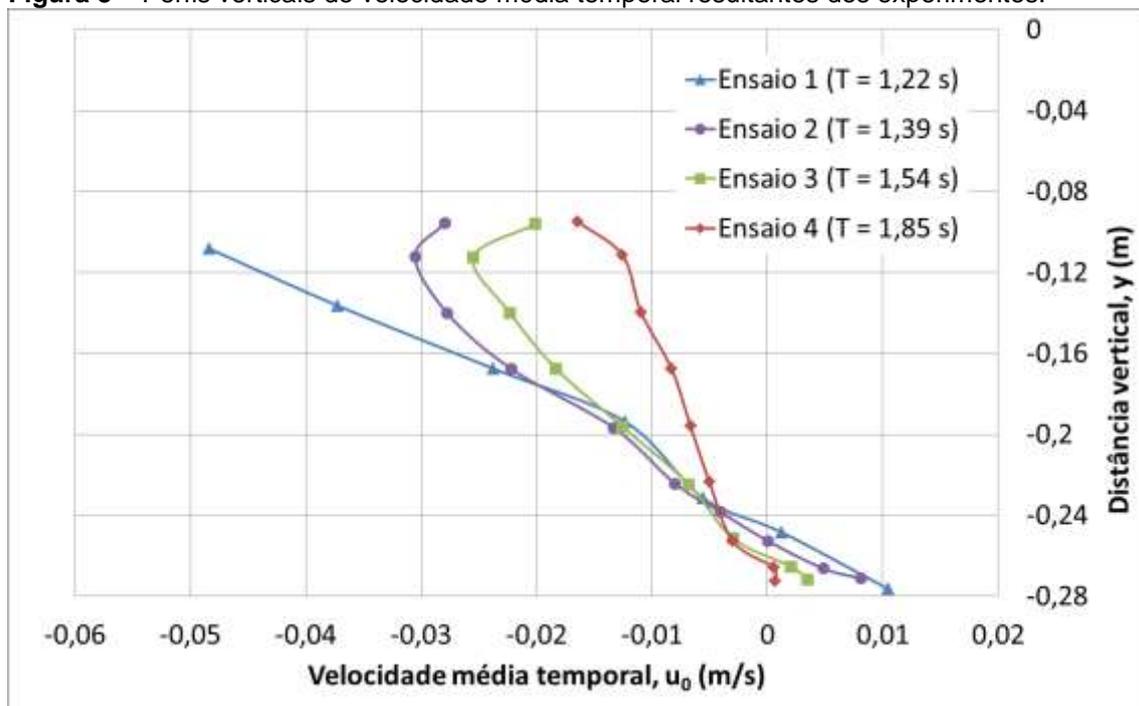
## 2.1 Resultados e Discussões

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 3 apresenta os perfis verticais de velocidade média temporal ( $u_o, y$ ) obtidos para os quatro ensaios realizados. No gráfico, os valores positivos de velocidade média  $u_o$  indicam um transporte na direção de propagação das ondas, ou seja, em direção à praia. Em contrapartida, valores negativos de  $u_o$  indicam um transporte na direção contrária à propagação das ondas, ou seja, em direção ao gerador de ondas.

Através da Figura 3 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. Ademais, podemos verificar que em todos os ensaios realizados

apresentou-se o mesmo padrão de recirculação: a região junto ao fundo desenvolve um transporte de massa em direção à praia, já a região superior apresenta um fluxo de retorno ao gerador de ondas. 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 3** – Perfis verticais de velocidade média temporal resultantes dos experimentos.



Fonte: AUTORES.

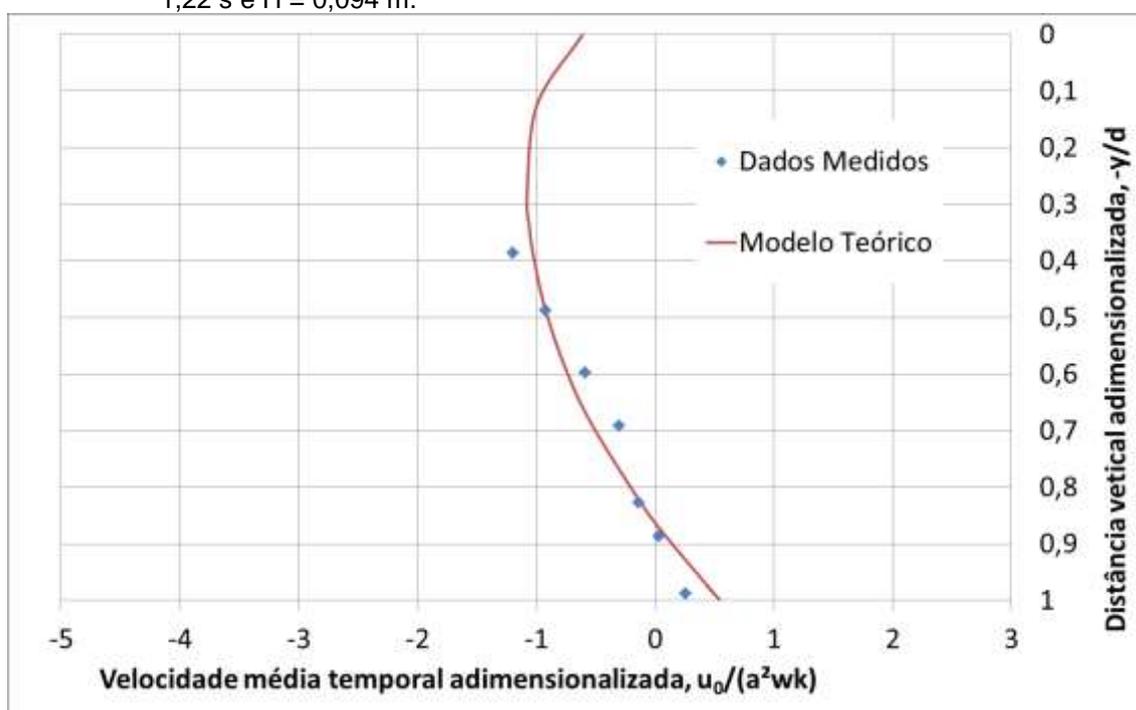
Nos gráficos abaixo (Figuras 4 até 7) os perfis de velocidade medidos foram comparados com a equação teórica (Equação 3) prevista por Longuet-Higgins (1953) na forma adimensionalizada, as quais relaciona a posição vertical  $y$  e a velocidade média temporal  $u_0$  com as seguintes grandezas:

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

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

Para todos os ensaios, o formato do perfil teórico se mostrou muito similar à 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 períodos mais longos, a partir de 1,54 s a discrepância com os dados medidos é ligeiramente acentuada. Este fato pode estar associado à maior reflexão junto à praia pelas ondas de maior período, que, por sua vez, possuem menor esbeltez ( $H/L$ ).

**Figura 4** – 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.

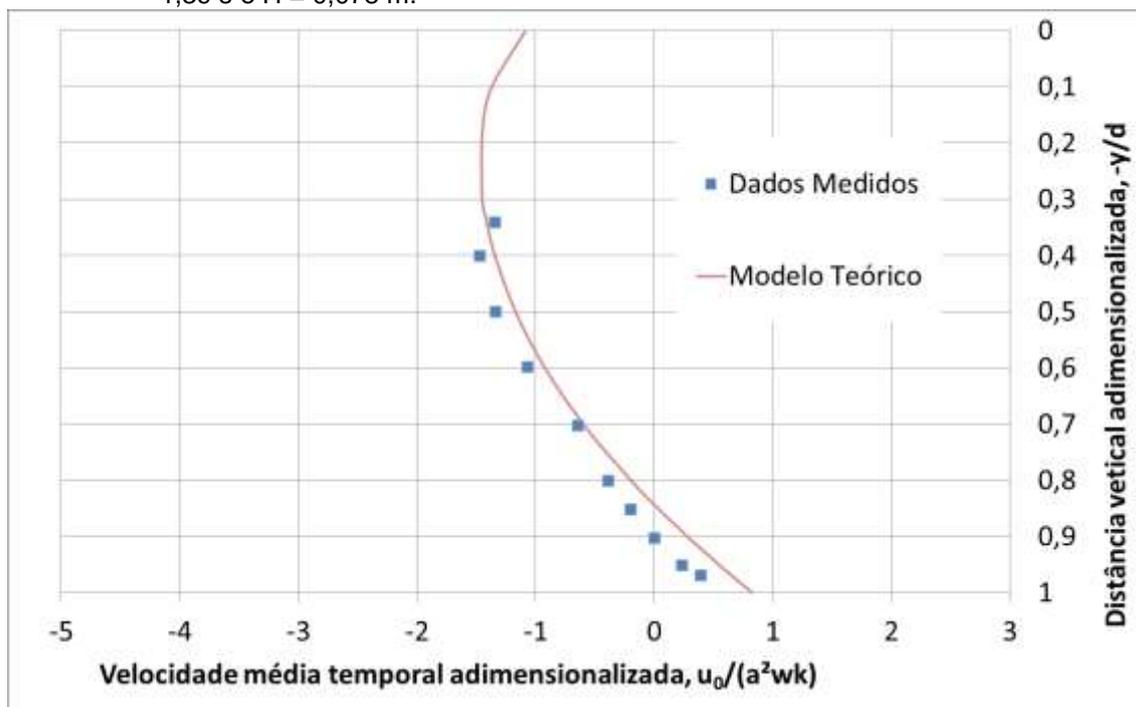


Fonte: AUTORES.

Junto da camada limite, apesar da direção do transporte ter sido bem prevista pelo modelo, parece ocorrer uma superestimativa de 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 2 com  $T = 1,39$  s e  $H = 0,078$  m.



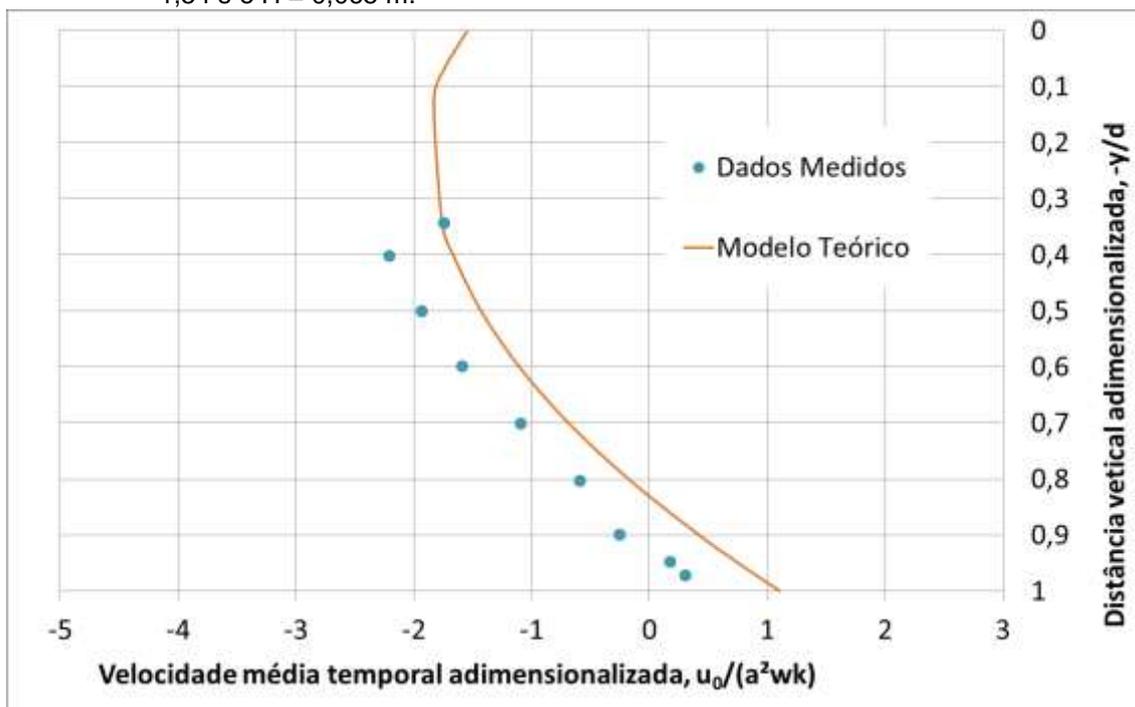
Fonte: AUTORES.

### 3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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 adequadamente comparado com os dados experimentais através da medição dos perfis verticais da velocidade média temporal.

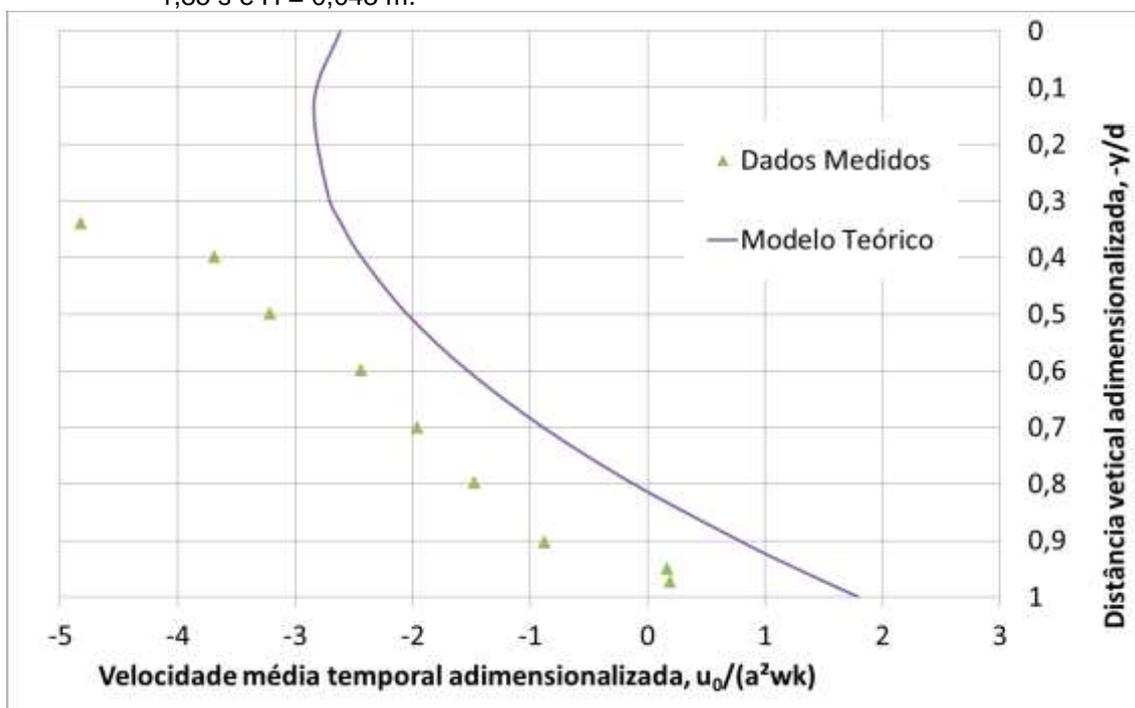
A partir das análises foi possível identificar em todos os casos simulados o mesmo padrão de recirculação: uma corrente em direção à praia junto ao fundo e uma corrente de retorno junto à superfície. Os resultados apresentam uma elevada similaridade com o modelo teórico na forma do perfil. Porém, nas

**Figura 6** – 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.



Fonte: AUTORES.

**Figura 7** – 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.



Fonte: AUTORES.

camadas mais afastadas ao 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, refinando, assim, os resultados encontrados. Finalmente, os métodos utilizados se mostraram adequados, permitindo esboçar claramente a recirculação que ocorre no canal, simulando e quantificando a circulação oceânica, auxiliando e contribuindo para novos estudos de caso.

## REFERÊNCIAS

BULLOCK, G.N. e SHORT, I. Water Particle Velocities in Regular Waves, **Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering**, v. 111, n. 2, p. 189-200, mar. 1985.

CLEMENTE, D.S. **Energia das Ondas: Metodologia de Ensaios em Modelos Reduzidos**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil, 2013.

LONGUET-HIGGINS, M. S. Mass transport in water waves. **Philosophical Transactions of the Royal Society London Series A-Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 245, p. 535–581, 1953.

PAPROTA, M., SULISZ, W. e REDA, A. Experimental study of wave-induced mass transport. **Journal of Hydraulic Research**, v. 54, n. 4, p. 423-434, 2016 DOI:10.1080/00221686.2016.1168490.

ROSAURO, N.M.L. Teoria e Prática da Geração e Propagação de Ondas Monocromáticas em um Canal de Laboratório. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9., n. 1, 2004.

RUSSEL, R. C. H. e OSORIO, J. D. C. An experimental investigation of drift profile in a closed channel, **Proceedings of the 6th International Conference on Coastal Engineering**, New York, ASCE, p. 293–305, 1957.

STOKES, G. G. On the theory of oscillatory waves, **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, v. 8, p. 441–455, 1847.

UMEYAMA, M. 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**, v. 370, p. 1687–1702, 2012.

Enviado em: 21 abr. 2017

Aceito em: 23 jun. 2017

Editores responsáveis: Mateus das Neves Gomes/ Liércio André Isoldi