

## CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS A JUSANTE DE DISSIPADOR POR RESSALTO HIDRÁULICO

Ana Paula Gomes<sup>1\*</sup>; João Batista Pelufo Silveira<sup>2</sup>; Marcelo Giulian Marques<sup>3</sup> & Luiz Augusto Magalhães Endres<sup>4</sup>

**Resumo** – A ação das ondas nas margens de rios provoca o desprendimento de material, tornando-as vulneráveis a erosão. O trabalho apresenta uma descrição de vários experimentos realizados em um modelo reduzido parcial de um vertedouro em degraus com um canal a jusante, instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS). Diferentes condições de vazão e submergência foram consideradas, com o objetivo de estudar as características principais de ondas, tais como, altura e período, que atuam sobre as margens em áreas de influência de aproveitamento hidrelétrico. Uma análise temporal e espectral foram realizadas com base nos dados medidos e apresentada neste trabalho. Os resultados das análises indicam, em uma primeira abordagem, que as características principais das ondas estão mais relacionadas com a vazão do que com a submergência.

**Palavras-Chave** – Altura de Onda, Período Característicos de Onda.

## DOWNSTREAM WAVE CHARACTERISTICS OF HYDRAULIC DISSIPATION FOR HYDRAULIC REBOUND

**Abstract** – The wave actions on the river banks provoke material detachment, making them vulnerable to erosion. The work presents a description of many experiments made in a partial reduced model of a stepped spillway with a downstream channel, installed in Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS). Different flows and submergences conditions were considered, with the objective of study the main wave characteristics, like height and period, that act on the banks in influence areas of hydroelectric use. A temporary and a spectral analysis were made based on measured data and submitted on this work. The analysis results show that the main wave characteristics are more related to the flow than to the submergence.

**Keywords** – height wave, period wave characteristics.

### 1. INTRODUÇÃO

A estabilização das margens, sob o ponto de vista hidráulico, significa manter a seção do curso d'água estável para sua utilização como via de navegação, elemento de um sistema de drenagem, aproveitamento hidrelétrico ou abastecimento de água. Os principais fatores que afetam esta estabilidade das margens por ação do escoamento são subdivididos em: ação erosiva das correntes, ação das ondas e irregularidades localizadas no escoamento. As ondas, uma das causas da erosão das margens, podem ser produzidas por diferentes agentes como o vento, embarcações ou a operação de estruturas hidráulicas do tipo comporta, nas usinas hidrelétricas e estações elevatórias (Brighetti e Martins (2001)).

A operação de estruturas hidráulicas provoca uma série de modificações nas condições naturais do escoamento junto às margens, tanto a montante como a jusante, gerando inúmeros problemas ambientais e econômicos. Um dos fatores que está associado a estes problemas é a

<sup>1</sup>Universidade Federal do Rio Grande – FURG, [anagomes@furg.br](mailto:anagomes@furg.br)

<sup>2</sup>Dona Francisca Energética – DFESA, [joaopelufo@hotmail.com](mailto:joaopelufo@hotmail.com)

<sup>3</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, [mmarques@ufrgs.br](mailto:mmarques@ufrgs.br)

<sup>4</sup>Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS, [endres@ufrgs.br](mailto:endres@ufrgs.br)

erosão que, além de degradar as margens, afeta a mata ciliar e provoca posterior erosão do solo, altera o habitat dos organismos, causando a diminuição da sua população, contribui para um maior assoreamento do reservatório ou leito do rio a jusante, prejudicando a vida útil do empreendimento, a geração de energia, a navegação, aumentando a turbidez da água e afetando o ambiente.

Além disso, estruturas no canal tais como pontes ou tubulações que cruzam o leito do rio, podem estar sujeitas a recalques danificando a integridade estrutural e, se as margens do canal estão no ponto de ataque da corrente, propriedades agrícolas, industriais ou residenciais podem ser danificadas (ICOLD (1989)).

As margens do reservatório devem sempre ser protegidas com vegetação ciliar ou utilizadas seguindo práticas conservacionistas. Mesmo assim podem ocorrer erosões nas suas margens, seja por embate de ondas ou pelo alto grau de encharcamento em períodos chuvosos, provocando a queda de taludes (Carvalho *et al.* (2000)).

Em função do exposto verifica-se a necessidade de estudos que contribuam na identificação de padrões de ondas atuantes sobre margens de aproveitamentos hidrelétricos, principalmente as geradas por ações antrópicas inerentes à operação das usinas.

O presente trabalho é parte de uma complementação de projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado Determinação das Características Geométricas da Soleira Terminal em Bacias de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus, conduzido em parceria entre Dona Francisca Energética S. A. (DFESA) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O objetivo principal desta complementação do projeto de pesquisa é uma análise experimental dos processos físicos envolvidos na estabilidade e proteção de margens sujeita à ação de ondas provocadas por dissipadores de energia.

As informações obtidas, até o presente momento, servirão para contribuir na identificação das características principais de ondas que atuam sobre as margens em áreas de influência de aproveitamentos hidrelétricos. Uma vez identificadas estas características principais, tais como alturas e períodos das ondas, serão estudados, posteriormente, critérios para simulação destas ondas em um canal de laboratório visando estudos de proteção de margens.

## **2. METODOLOGIA**

Os experimentos foram realizados em um modelo reduzido parcial de um vertedouro em degraus com canal a jusante, instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O modelo apresenta 2,45 m de altura, 0,40 m de largura e um perfil do tipo Creager. O vertedouro apresenta uma inclinação de aproximadamente 53° com a horizontal (Figura 1).

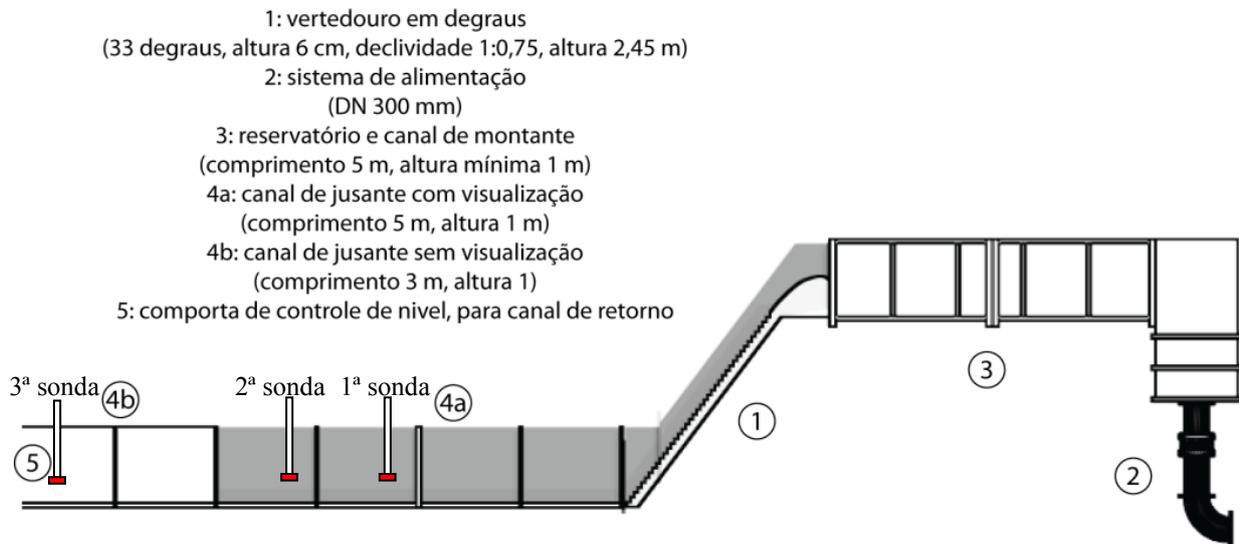


Figura 1 – Representação esquemática do modelo utilizado e posições relativas das sondas de medição de nível: 1ª sonda no final do ressalto hidráulico (escoamento da direita para a esquerda). (Adaptado MARQUES et al (2013)).

Para cada condição ensaiada foram identificadas as posições de final do ressalto, onde foi instalada uma sonda de medição da elevação da superfície livre da água (1ª sonda). Outras duas sondas foram instaladas: uma sempre a um metro de distância da primeira (2ª sonda) e a outra junto ao piezômetro (3ª sonda), utilizado na medição da profundidade de água a jusante do ressalto hidráulico. A primeira e a segunda sonda tiveram suas posições variando, sempre de acordo com o comprimento do ressalto. A terceira sonda teve sua posição sempre fixa independente do comprimento do ressalto. Neste trabalho foram utilizados somente os registros obtidos na primeira sonda.

As sondas utilizadas são do tipo capacitiva, constituídas por duas hastes paralelas de aço inoxidável que são posicionadas perpendicularmente à direção de propagação das ondas. Quando a água entra em contato com as hastes, gera uma diferença de tensão entre as mesmas, sendo esta diferença de tensão proporcional ao comprimento da parte submersa das hastes e da condutividade da água. A diferença de tensão registrada em Volts é convertida para altura de água através dos parâmetros obtidos no processo de calibração da sonda.

As sondas e o sistema de condicionamento de sinais utilizados para medição das ondas são fabricadas pelo DHI (Danish Hydraulic Institute). O amplificador foi conectado a uma placa de aquisição de dados marca National Instruments, modelo USB 6008. Para aquisição dos dados foi utilizado o software da National Instruments LabView – Signal Express.

Os registros de dados foram feitos com frequência de aquisição igual a 200 Hz e duração mínima de 5 minutos. Cada situação foi registrada em 3 ensaios repetidos, denominados testes T1, T2 e T3. A Tabela 1 mostra as características dos ensaios.

Tabela 1: Parâmetros do escoamento e posições das sondas de nível nos ensaios realizados, medidas em metros, a partir do início do ressalto hidráulico.

Q (l/s)	Sonda	S=1,0: h=265mm	S=1,1: h=289mm	S=1,2: h=317mm
40	1	3,05	3,21	3,30
	2	4,05	4,21	4,30
	3	6,56	6,56	6,56
Q (l/s)	Sonda	S=1,0: h=339mm	S=1,1: h=375mm	S=1,2: h=408mm
60	1	4,17	4,12	4,29
	2	5,17	5,12	5,29
	3	6,56	6,56	6,56

Q (l/s)	Sonda	S=1,0: h=409mm	S=1,1: h=449mm	S=1,2: h=490mm
80	1	4,76	4,78	4,74
	2	5,76	5,78	5,74
	3	6,56	6,56	6,56

$S = h/Y2 =$  submergência do ressalto hidráulico;  $h =$  profundidade medida junto ao piezômetro;  $Y2 =$  profundidade conjugada lenta do ressalto hidráulico.

Para cada uma das 9 condições de escoamento, para a 1ª sonda e em cada repetição, foram obtidos dos registros os períodos e alturas de onda, tanto através de análise temporal (domínio do tempo) quanto de análise espectral (domínio da frequência), visando identificar variações e diferenças entre estes parâmetros e selecionar períodos e alturas características, com melhor representatividade para uso nos ensaios previstos na continuidade da pesquisa.

Na análise temporal, adotou-se o critério de definição de onda conhecido por “zero ascendente”. Conforme indicado na Figura 2, este critério consiste em, subtrair dos registros ( $\eta$ ) o nível médio da superfície. Em seguida, buscam-se os pontos onde a superfície livre cruza a linha de nível médio (eixo horizontal da escala de tempo  $t$ ) “subindo” (zeros-ascendentes). Dois pontos de zeros-ascendentes consecutivos definem uma onda individual sendo a altura dessa onda ( $H$ ) a distância vertical entre o ponto mais alto (crista) e o ponto mais baixo (cava) e o período ( $T$ ) é o intervalo de tempo entre esses dois pontos. Uma descrição detalhada do método e da determinação de parâmetros característicos das ondas pode ser encontrada em Goda (2010).

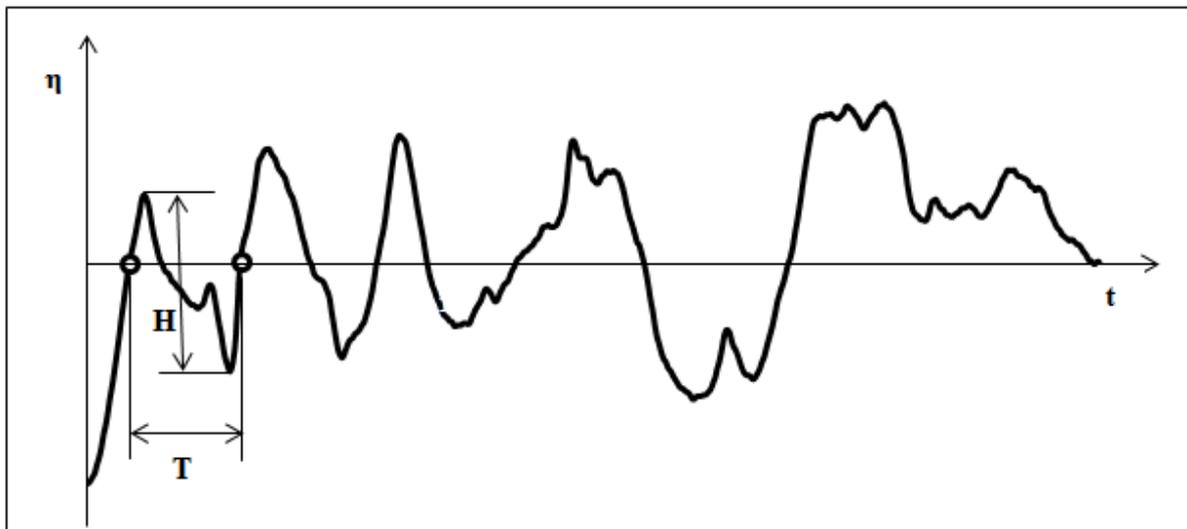


Figura 2 – Identificação de ondas individuais.

Na análise espectral foi utilizada a técnica de estimativa da função de densidade espectral proposta por Welch e janela de Hanning, com tamanho aproximado de 1/16 do tamanho da amostra. Não foi feita filtragem dos dados medidos para permitir a identificação de eventuais efeitos de mais alta frequência, que se mostraram inexistentes ou insignificantes em todos os registros, além dos relacionados ao pico do espectro, que apareceram na faixa de frequências mais baixas e bastante destacados dos demais.

Através da análise temporal, para cada um dos registros obtidos, foram determinados os períodos máximo ( $T_{máx}$ ), significativo ( $T_s$ ) e médio ( $T_{médio}$ ) das ondas, além da altura significativa ( $H_s$ ).

Através da análise espectral, para cada um dos registros obtidos, foram determinados o período de pico ( $T_p$ ) e a altura  $H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$ , sendo  $m_0$  a área sob o gráfico da função de densidade espectral e o período de pico o correspondente à máxima energia do espectro calculado.

Em trabalhos futuros, relatando a continuidade da presente pesquisa, serão apresentados e analisados outros parâmetros do escoamento e da agitação da superfície da água, na região analisada, além dos mostrados neste artigo. Esses novos resultados e interpretações estarão baseados nas medições das duas outras sondas de níveis (2ª e 3ª conforme figura) e em medições de perfis de velocidades do escoamento, realizadas imediatamente após o final do ressalto hidráulico, que podem acarretar significativa alteração sobre as características das ondas às quais esteja superposto (Herchentoder (1981)).

### 3. RESULTADOS

A Figura 3 apresenta os dados dos períodos característicos para a 1ª sonda, obtidos através da média dos três testes realizados para cada situação. Este procedimento foi utilizado pela ocorrência dos valores obtidos em cada teste mostrarem-se muito próximos (com exceção dos valores obtidos para o período máximo) com um desvio padrão menor que 10%, reunindo-se assim os testes T1, T2 e T3 para cada situação separadamente.

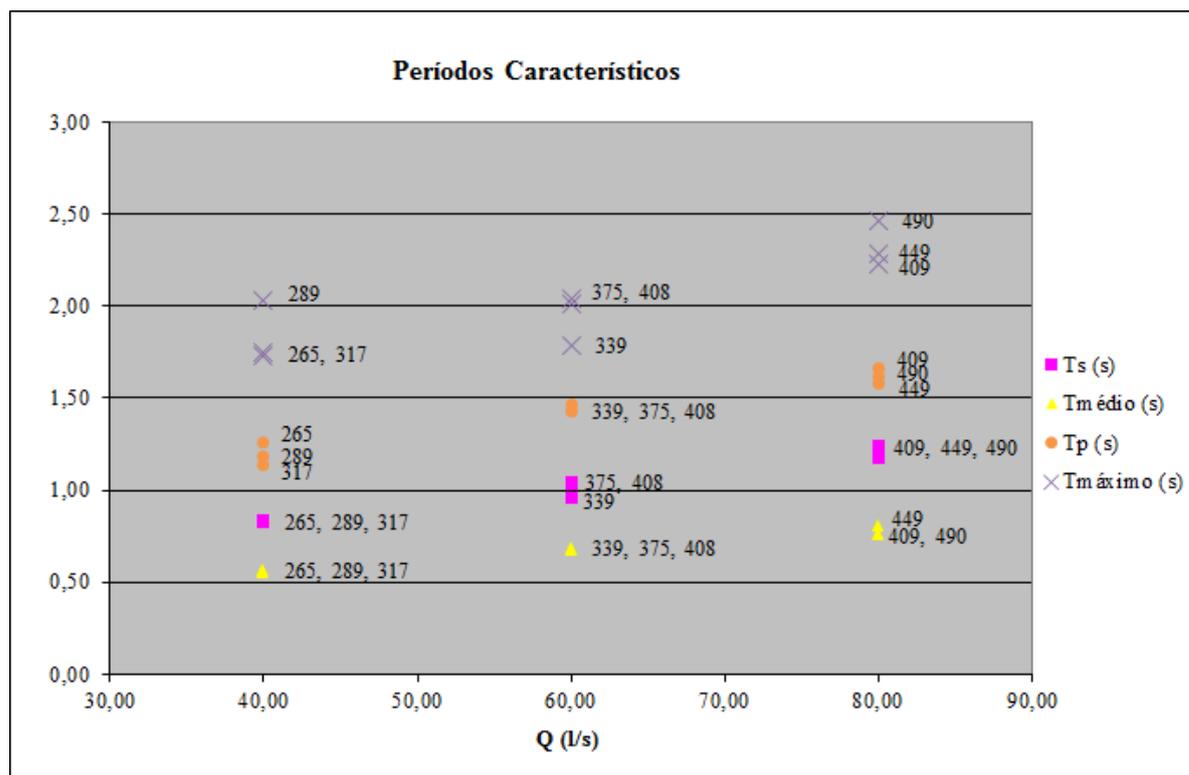


Figura 3 – Períodos característicos das ondas: ao lado dos pontos estão indicados os níveis de água a jusante do ressalto hidráulico (valores médios dos testes).

Através da Figura 3 é possível observar que os períodos são claramente crescentes com o aumento da vazão escoada.

Verifica-se que para uma mesma vazão não há praticamente variações com os períodos significativos ( $T_s$ ), períodos de pico ( $T_p$ ) e períodos médios ( $T_{médio}$ ) em função da submergência.

Os períodos máximos ( $T_{máx}$ ) identificados, para uma mesma vazão, apresentam maiores variabilidade de resultados comparados aos demais, o que já era esperado em função de tratar com a

identificação de uma onda isolada em uma superfície com agitação bastante complexa como a que ocorre em um ressalto hidráulico a jusante de vertedor.

Em resumo, considerando a média dos valores encontrados para uma mesma vazão e diferentes submergências, obtemos valores de períodos a serem empregados nos testes de geração de ondas regulares, apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Períodos significativos e períodos de pico a serem empregados nos testes de geração de ondas regulares.

Vazão (l/s)	40	60	80
Análise Temporal: Ts (s)	0,83	1,01	1,21
Análise Espectral; Tp (s)	1,19	1,44	1,62

Como se observa em cada vazão, os resultados dos períodos a partir da análise espectral são sistematicamente maiores do que os períodos a partir da análise temporal. Este fato pode ser explicado pela consideração de todas as ondas do registro no cálculo de Tp, através da avaliação da energia total do espectro, em contraposição à consideração de apenas um terço dos períodos das ondas, as que possuem maiores alturas identificadas, no cálculo de Ts. Parece haver indicação de que as ondas de menor altura, então, possuem períodos maiores conduzindo ao resultado verificado.

A Figura 4 apresenta as alturas significativas, calculadas a partir das análises temporal e espectral, para os dados medidos na 1ª sonda, valores estes obtidos através da média dos três testes realizados para cada situação. Para a vazão de 60 l/s e submergência de 408 mm a média dos três testes apresentou um desvio padrão na ordem de 30%. Para a vazão de 80 l/s e submergência de 449 mm a média dos três testes apresentou um desvio padrão de 24%. Para as demais considerações o desvio padrão para a média dos três testes apresentou-se menor que 15%.

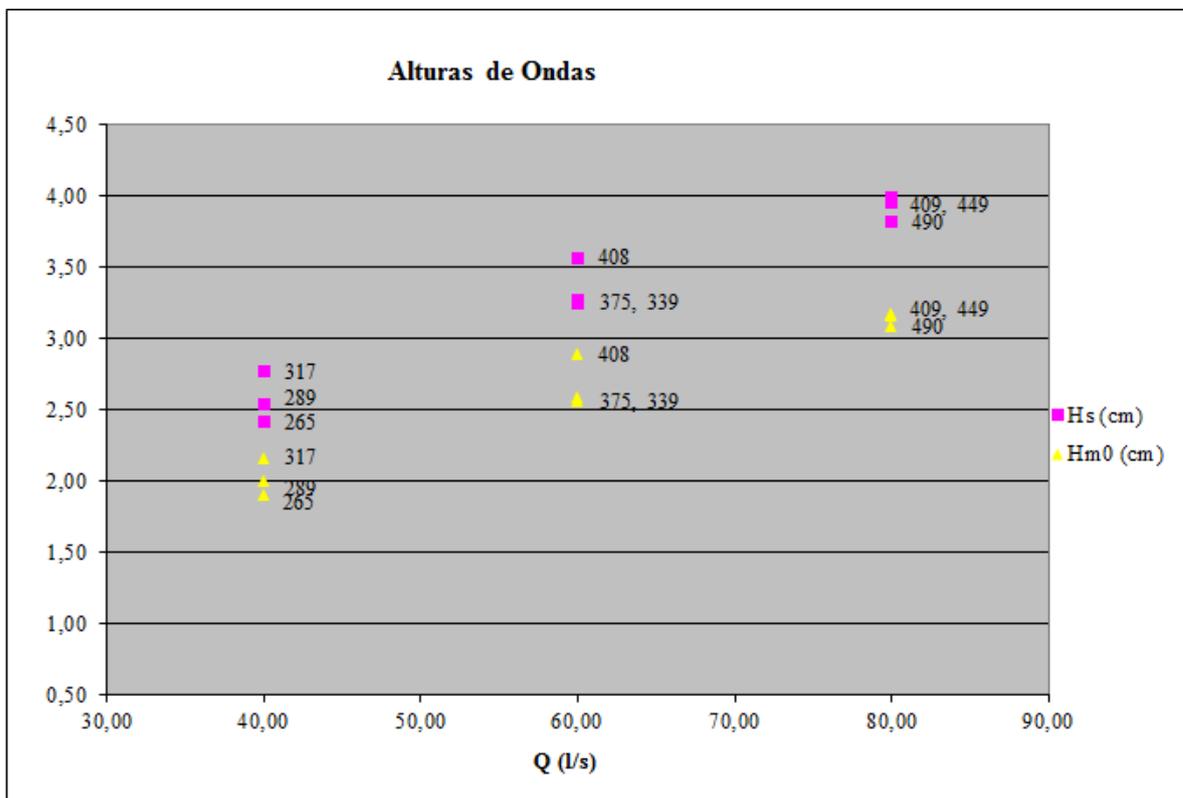


Figura 4 – Alturas de ondas: ao lado dos pontos estão indicados os níveis de água a jusante do ressalto hidráulico (valores médios dos testes).

Considerando as alturas significativas obtidas na análise espectral ( $H_{m0}$ ) e temporal ( $H_s$ ), para as vazões de 40 l/s e 60 l/s foi possível verificar maiores alturas de ondas nas maiores submergências. Esse comportamento não parece ocorrer de maneira consistente na vazão de 80 l/s.

Em resumo, considerando a média dos valores encontrados para uma mesma vazão e diferentes submergências, obtemos valores de alturas de ondas a serem empregados nos testes de geração de ondas regulares, apresentados na tabela 3.

Tabela 3: Alturas de ondas a serem empregados nos testes de geração de ondas regulares.

Vazão (l/s)	40	60	80
Análise Temporal: $H_s$ (cm)	2,57	3,36	3,92
Análise Espectral: $H_{m0}$ (cm)	2,02	2,68	3,14

Como se observa em cada vazão, os resultados das alturas a partir da análise espectral são sistematicamente menores de que as alturas a partir da análise temporal. Este fato pode ser explicado pela consideração de todas as ondas do registro no cálculo de  $H_{m0}$ , através da avaliação da energia total do espectro, em contraposição à consideração de apenas um terço das maiores alturas de ondas, no cálculo de  $H_s$ .

As figuras mostram que os parâmetros característicos dos períodos (Fig. 3) e das alturas (Fig. 4) dependem mais da vazão em escoamento no canal do que da submergência do ressalto hidráulico formado a jusante do vertedor. Este fato pode indicar que, em uma transposição da situação testada do laboratório para a natureza, a geometria do curso d'água e eventuais efeitos responsáveis por elevação de níveis de água a jusante da barragem não interferem significativamente na altura e no período das ondas ali geradas.

Das Tabelas 2 e 3, também fica clara a relação entre os períodos significativos ( $T_s$ ), as alturas significativas ( $H_s$ ) e as vazões de operação da barragem. Os dados observados permitem inferir que o período significativo assim como a altura significativa varia com a vazão de operação de acordo com a Figura 5.

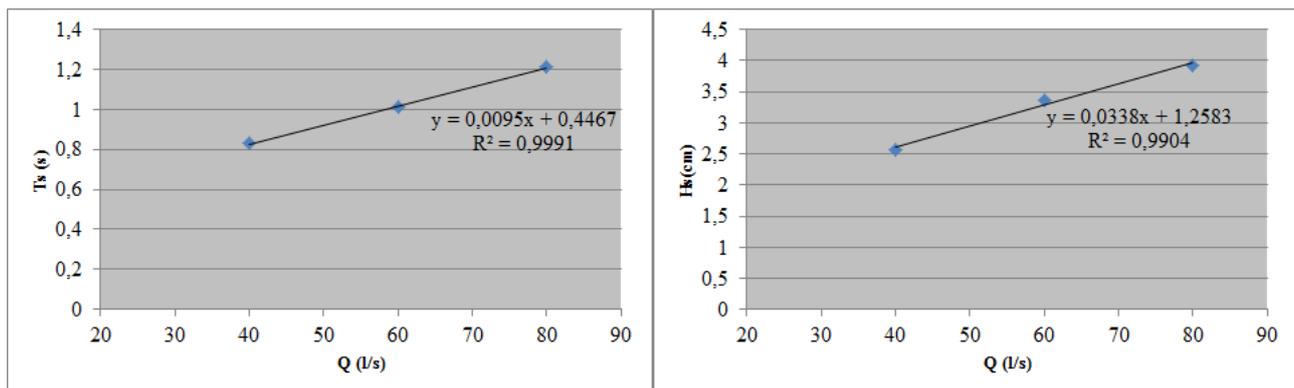


Figura 5 – Relação da variação da altura e do período significativo de ondas com a vazão.

Através da Figura 5 é possível verificar uma boa relação entre o período e a altura significativa de onda com a vazão. É possível observar também que a vazão influencia mais na altura significativa do que no período significativo de onda.

#### 4. CONCLUSÕES

A identificação dos parâmetros período e altura de onda, que caracterizam cada situação de vazão e submersão ensaiada no escoamento pelo vertedor em degraus, têm como objetivo a reprodução dessa onda em um canal de ondas regulares sobre taludes compostos por material granular e avaliação de seu efeito erosivo através de análises comparativas entre os testes.

A análise do conjunto de todas as medições realizadas sugere a possibilidade, em uma primeira abordagem, de desconsiderar o parâmetro submersão na reprodução dessas ondas.

Ao considerar os parâmetros selecionados, comparando os resultados das análises temporal e espectral, resumidos nas tabelas anteriores, verifica-se que da análise temporal temos alturas maiores e períodos menores, enquanto, da análise espectral, resultam alturas menores com períodos maiores, para as ondas em cada vazão ensaiada.

A continuidade dos trabalhos no projeto de pesquisa no qual este trabalho está inserido deverá indicar qual a escolha de parâmetros, para a reprodução das ondas em canal de ondas, é a mais indicada ao atendimento dos objetivos propostos e se haverá necessidade de complementação das medições e das análises efetuadas.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Dona Francisca Energética S. A. pelo apoio financeiro empregado na infraestrutura dos experimentos e no aporte de bolsas de iniciação científica e de pós-graduação, ao CNPq pelo financiamento de bolsa de iniciação científica e aos funcionários do Laboratório de Obras Hidráulicas pelo apoio técnico.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRIGHETTI, G., MARTINS, J. R. S. (2001). *Estabilização e Proteção de Margens*. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária.

ICOLD, International Commission on Large Dams (1989). *Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues*. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris.

CARVALHO, N. O; FILIZOLA Jr., SANTOS, P. M. C; LIMA, J. E. F. W. (2000). *Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios*. ANEEL. Brasília.

GODA, YOSHIMI. (2010). *Randon seas and design of maritime structures*. 3rd editon. Advanced series on ocean engineering-volume 33. World scientific publishing Co.Pte.Ltd.

HERCHENRODER, B. E. (1981). *Effects of currents on waves* – Coastal Engineering Technical Aid N° 81-14. USACE.

MARQUES, M. G., PELUFO, J., CONTERATO, E., NOVAKOSKI, C. K. (2013). *Avaliação da Distribuição das Pressões Médias Junto ao Fundo de uma Bacia de Dissipação por Ressonância Hidráulica a Jusante de Vertedouro em Degraus*. XXIX SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS.