

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Eduardo Pivatto Marzec

**CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS A JUSANTE DE
DISSIPADOR POR RESSALTO HIDRÁULICO**

Porto Alegre
dezembro 2014

EDUARDO PIVATTO MARZEC

**CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS A JUSANTE DE
DISSIPADOR POR RESSALTO HIDRÁULICO**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Luiz Augusto Magalhães Endres
Coorientadora: Ana Paula Gomes

Porto Alegre
dezembro 2014

EDUARDO PIVATTO MARZEC

**CARACTERIZAÇÃO DE ONDAS A JUSANTE DE
DISSIPADOR POR RESSALTO HIDRÁULICO**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2014

Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres
Dr. pela UFRGS
Orientador

Profª. Ana Paula Gomes
Mestre pela UFSM
Coorientadora

Profª. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Prof. Marcelo Giulian Marques (UFRGS)
PhD. pela Université Laval

Prof. Eder Daniel Teixeira (UFRGS)
Dr. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, João e Ana, que sempre me apoiaram e especialmente durante o meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, pelo incentivo e ajuda em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Luiz Endres, orientador deste trabalho, pela dedicação e pelo acompanhamento durante todo o desenvolvimento da pesquisa.

Ao Prof. Marcelo Marques, pelas sugestões e atenção ao longo do tempo em que fui bolsista de Iniciação Científica.

À Profa. Ana Paula Gomes, que trabalhou na mesma linha de pesquisa, pela colaboração com material e sugestões.

À Prof. Carin Maria Schmitt, coordenadora da disciplina do Trabalho de Diplomação, pela dedicação.

Aos colegas do Laboratório de Obras Hidráulicas, pela amizade e pelo auxílio no desenvolvimento da pesquisa.

Os que se encantam com a prática sem a ciência são como os timoneiros que entram no navio sem timão nem bússola, nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo da Vinci

RESUMO

O dissipador de energia por ressalto hidráulico costuma ser bastante empregado para a proteção de estruturas hidráulicas de aproveitamentos hidrelétricos. Este tipo de dispositivo promove uma grande absorção da energia de queda no local do impacto, denominado bacia de dissipação. Dependendo das condições em que este processo ocorre, podem surgir ondas a jusante do escoamento, as quais podem percorrer grandes distâncias ao longo do rio e provocar um forte processo erosivo, tanto nas margens quanto em estruturas que utilizem o leito para sustentação. Neste trabalho, através da utilização de um modelo físico constituído de um canal retangular com um vertedouro em degraus, foram simuladas algumas condições de cheias ocorridas na barragem da UHE Dona Francisca de propriedade da Energética SA. Para medir a variação da altura da superfície livre, uma sonda capacitiva foi posicionada a jusante do ressalto hidráulico sob condições pré-estabelecidas. Para caracterizar o processo ondulatório, foram utilizadas as técnicas de análise nos domínios do tempo e da frequência para a determinação de alturas significativas e períodos dominantes, seguindo procedimentos normalmente empregados na Engenharia Costeira. Os resultados permitiram estabelecer relações entre a altura significativa da onda e o número de Froude incidente no ressalto, tanto para ressalto livre como submerso. Foi possível chegar também a uma equação para cálculo do período de pico da onda em função do número de Froude incidente, no caso de ressalto livre. Realizou-se uma comparação dos resultados deste trabalho com os obtidos de experimentos anteriores, obtendo-se valores muito próximos.

Palavras-chave: Dissipação de Energia por Ressalto Hidráulico. Caracterização de Ondas a Jusante de Barragens. Modelo Físico com Vertedouro em Degraus. Análise Espectral.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa.....	29
Figura 2 – Alturas conjugadas do ressalto hidráulico.....	36
Figura 3 – Classificação do ressalto hidráulico em função do número de Froude.....	40
Figura 4 – Características da onda.....	45
Figura 5 – Exemplo de um registro ondulatório do oceano.....	45
Figura 6 – Forma da onda resultante da soma de duas senóides.....	46
Figura 7 – Perfil de velocidades de uma partícula de água dentro de uma onda progressiva.....	48
Figura 8 – Trajetórias de uma partícula de água dentro de ondas progressivas com diferentes profundidades relativas.....	49
Figura 9 – (a) tipos de espectro; (b) espectros de energia com faixa larga (à esquerda) e estreita (à direita).....	55
Figura 10 – Exemplo de um espectro com registro da agitação marítima.....	56
Figura 11 – Modelo reduzido utilizado.....	59
Figura 12 – Detalhe do vertedouro em degraus.....	60
Figura 13 – Detalhe da sonda utilizada: (a) vista superior; (b) vista lateral.....	61
Figura 14 – Exemplo de registro da calibração.....	62
Figura 15 – Ensaio com a vazão de 40 l/s – (a) ressalto no pé do vertedouro; (b) ressalto afastado do vertedouro.....	63
Figura 16 – Exemplo de aplicação do método ascendente 4 pontos.....	67
Figura 17 – Altura significativa em relação à vazão de escoamento.....	70
Figura 18 – H_s/h_2 em relação a Fr_1 (ressalto livre).....	71
Figura 19 – U_1*Tp/h_1 em relação a Fr_1 (profundidade constante).....	71
Figura 20 – H_s/h_1 em relação a Fr_1 (ressalto livre).....	73
Figura 21 – U_1*Tp/h_1 em relação a Fr_1 (ressalto livre).....	74
Figura 22 – $g*H_s/Tp^2$ em relação a h_2/h_1	75
Figura 23 – H_s/Tw em relação a Fr_1	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Posição da sonda para cada ensaio.....	64
Tabela 2 – Relação de todos os ensaios realizados.....	65
Tabela 3 – Altura significativa e período de pico nos casos de ressalto livre.....	69

LISTA DE SIGLAS

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

LOH – Laboratório de Obras Hidráulicas

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

y – profundidade de água utilizada nas medições de ondas por vento (m)

V – velocidade do vento (m/s)

L_0 – *fetch*: pista de atuação do vento (m)

m – inclinação adimensional do talude

k – rugosidade adimensional do talude

d – profundidade de água medida desde a base do talude (m)

ρ – massa específica da água (kg/m³)

μ – coeficiente de viscosidade dinâmico (N*s/m²)

σ – tensão superficial da água (N/m)

H_i – altura de onda incidente (m)

T – período da onda (s)

H_s – altura de onda significativa (m)

T_p – período de pico de um registro ondulatório (s)

R_u – altura de subida da onda na estrutura (m)

H_r – altura de onda refletida (m)

g – aceleração da gravidade (m/s²)

h_1 – altura conjugada rápida do ressalto (m)

h_2 – altura conjugada lenta do ressalto (m)

Fr_1 – número adimensional de Froude incidente no ressalto hidráulico

U_1 – velocidade de impacto do jato (m/s)

h_r – profundidade de restituição (m)

X – distância do ressalto até o ponto de medição (m)

ΔL_1 – comprimento do ressalto hidráulico (m)

S – índice de submergência

L – comprimento da onda (m)

C – celeridade (m/s)

η – deslocamento vertical da superfície da água (m)

\emptyset – potencial de velocidades

H – altura de onda (m)

σ_0 – frequência angular da onda (rad/s)

t – instante de tempo (s)

k_0 – número da onda

x – distância medida na direção de propagação da onda (m)

z – coordenada vertical medida a partir do nível de repouso (m)

h – altura de água medida a partir do nível de repouso (m)

V_x – velocidade da onda na direção horizontal (m/s)

V_z – velocidade da onda na direção vertical (m/s)

x_1 = posição inicial em relação ao eixo horizontal (m)

z_1 = posição inicial em relação ao eixo vertical (m)

ζ – deslocamento horizontal da partícula de onda (m)

ξ – deslocamento vertical da partícula de onda (m)

E – energia do fluxo ondulatório por unidade de área superficial (J/m^2)

ϵ – taxa de transferência de energia (J/s)

n – fator de transmissão da energia da onda

η_0 – elevação média da superfície livre (m)

α_j – amplitude da onda (m)

ϕ_j – ângulo de fase da onda (rad)

i – número total de ondas de um registro

$S(f)$ – função variância da elevação da superfície livre

m_n – momento do espectro

$E(f)$ – densidade de variância

m_0 – momento do espectro de ordem zero

H_{rms} – altura média quadrática de um registro ondulatório (m)

f_p – frequência de pico de um registro ondulatório

H_0 – altura significativa obtida do espectro

T_{m01} – período da onda correspondente à frequência média do espectro (s)

$T_{1/3}$ – período da onda significativo (s)

V_M – velocidade de escoamento no modelo (m/s)

V_P – velocidade de escoamento no protótipo (m/s)

Q_M – vazão do modelo (m^3/s)

Q_P – vazão do protótipo (m^3/s)

q_m – vazão específica do modelo (m^2/s)

q_p – vazão específica do protótipo (m^2/s)

λ – relação entre as escalas geométricas de modelo e de protótipo

T_w – nível d'água a jusante do ressalto hidráulico (m)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
2 DIRETRIZES DA PESQUISA	27
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	27
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA	27
2.2.1 Objetivo principal	27
2.2.2 Objetivos secundários	27
2.3 PRESSUPOSTO	28
2.4 PREMISA	28
2.5 DELIMITAÇÕES	28
2.6 LIMITAÇÕES	28
2.7 DELINEAMENTO.....	28
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 GERAÇÃO DE ONDAS EM RIOS E EFEITOS SOBRE AS MARGENS.....	31
3.1.1 Geração de ondas pelo vento.....	32
3.1.2 Geração de ondas por embarcações.....	32
3.1.3 Geração de ondas pela operação de estruturas hidráulicas.....	33
3.1.4 Variáveis relevantes no impacto de ondas em taludes.....	34
3.2 DISSIPADORES DE ENERGIA.....	35
3.2.1 Dissipação por ressalto hidráulico.....	37
3.2.2 Ondas geradas por ressalto hidráulico.....	41
3.3 ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS.....	44
3.3.1 Ondas de pequena amplitude	46
3.3.2 Modelagem física	51
3.3.2.1 Condições de Semelhança	52
3.3.2.2 Condições de Semelhança Hidráulica.....	53
3.4 ANÁLISE ESPECTRAL	54
4 METODOLOGIA	59
4.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	59
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	61
4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE.....	66
5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
6 CONCLUSÕES	79

REFERÊNCIAS	81
-------------------	----

1 INTRODUÇÃO

Na execução das obras de barragens para fins de aproveitamentos hidrelétricos, é indispensável a instalação de uma estrutura de dissipação de energia hidráulica para os períodos de cheias. Nestes períodos, a usina normalmente atinge a sua capacidade limite de geração de energia e não aproveita toda a água a montante da barragem.

A estrutura construída para conduzir essa água excedente para jusante, promovendo, portanto, a segurança de toda a obra hidráulica, é o vertedouro, que pode ser liso ou em degraus. Os principais fatores levados em conta no projeto de um vertedouro são os custos de instalação e manutenção e o grau de segurança que este proporciona à barragem. Incluído no tema segurança da obra e de sua vizinhança, estão os efeitos do escoamento pelos vertedouros provocados nas margens dos rios, a jusante das barragens, normalmente recebendo atenção reduzida nas etapas de projeto.

Quando a água descarregada pelo vertedouro retorna ao curso de água após a barragem, geralmente é utilizado o fenômeno chamado de ressalto hidráulico, no qual a energia cinética do impacto se transmite ao rio. Uma parcela dessa energia se converte em ondas na superfície, as quais se propagam no curso da água. A identificação das características dessas ondas, tais como altura e período, é o foco deste trabalho. Para tanto, foram realizados ensaios no modelo reduzido de um vertedouro em degraus com canal a jusante, instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A correta descrição dos efeitos causados por ondas nas margens a jusante de aproveitamentos hidrelétricos é de fundamental importância para a contenção do processo erosivo.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: quais as características de ondas geradas a jusante de dissipadores por ressalto hidráulico, utilizados largamente em hidrelétricas, de forma que se possa contribuir para os projetos de proteção de margens de rios?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal do trabalho é a descrição das características das ondas atuantes a jusante do dissipador por ressalto hidráulico, através da análise em modelo físico bidimensional com vertedouro em degraus.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) apresentação de uma técnica de registro do fenômeno ondulatório;
- b) identificação do parâmetro de maior influência na variação das características das ondas. Esta faixa inclui o ressalto livre e o ressalto submerso com submergências de 10 e 20%.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que, com uso da teoria da semelhança e da análise dimensional, podem-se obter resultados válidos na prática através da aplicação de modelos físicos.

2.4 PREMISSA

O trabalho tem por premissa que:

- a) o uso frequente do dissipador por ressalto hidráulico provoca efeitos significativos nas margens dos rios a jusante de barragens, o que ainda necessita de maior entendimento;
- b) os critérios usuais para dimensionamento da proteção de margens não têm se mostrado seguro.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à utilização de modelo físico para simular as condições de cheias ocorridas na usina de Dona Francisca Energética SA, a qual utiliza um vertedouro em degraus.

2.6 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) o número de Froude do trecho supercrítico varia entre 4,49 e 7,44;
- b) o nível de submergência possui valores mínimo e máximo de 217 e 490 mm, respectivamente.

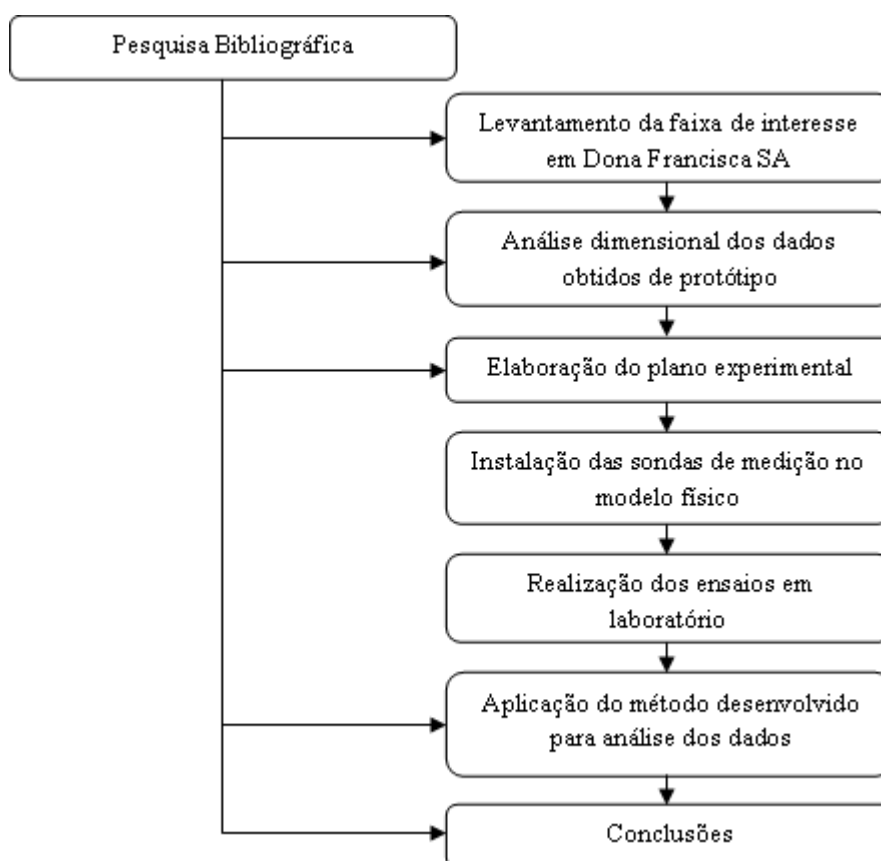
2.7 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 1, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) levantamento da faixa de interesse em Dona Francisca SA;

- c) análise dimensional dos dados obtidos do protótipo;
- d) elaboração da rotina de ensaios;
- e) instalação das sondas de medição no modelo físico;
- f) realização dos ensaios em laboratório;
- g) aplicação do método desenvolvido para análise dos dados;
- h) conclusões.

Figura 1 – Representação esquemática do delineamento da pesquisa



(fonte: elaborado pelo autor)

Primeiramente, realizou-se a pesquisa bibliográfica, na qual se teve bastante dificuldade devido a pouca existência de estudos similares a este. Foram buscadas informações relevantes que auxiliassem na realização dos ensaios em modelo físico feitos neste trabalho. Esta etapa estendeu-se ao longo de toda a pesquisa.

Após esta, seguiu-se um levantamento das condições de extravazamento ocorridas em Dona Francisca, uma usina localizada no centro do estado do Rio Grande do Sul. Através de um minucioso estudo das condições em que ocorreram essas cheias, foi feita uma análise dimensional com os dados pertencentes a faixa de interesse da pesquisa, possibilitando a

reprodução no modelo físico bidimensional do Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS (LOH).

Elaborou-se então uma rotina de ensaios, para medir as ondas a jusante do vertedouro colocado no canal. Sondas medidoras de nível foram instaladas, posicionadas de acordo com a análise de estudos anteriores encontrados na bibliografia e também respeitando aspectos dos equipamentos. Após a realização dos ensaios, analisaram-se os dados coletados, utilizando ferramentas da estatística e a técnica da análise espectral, com o objetivo de caracterizar o fenômeno ondulatório. Nesse sentido, utilizou-se um software desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil, de Portugal, como ferramenta auxiliar. Para finalizar o trabalho, identificaram-se os parâmetros de maior influência na formação das ondas a jusante de ressalto hidráulico, assim como as características dominantes destas quando ocorrem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foram abordados os assuntos necessários para obter um embasamento teórico, que demonstrou ser fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Primeiramente, elaborou-se um estudo sobre a formação das ondas em um ambiente fluvial, seguido por uma descrição sobre o fenômeno do ressalto hidráulico e suas formas de ocorrência. Após esta etapa, buscaram-se conceitos utilizados na Engenharia Costeira para análise da propagação das ondas em ambiente marítimo. Na parte final deste capítulo, foi feito um estudo sobre a modelagem física (método utilizado nesta pesquisa), e sobre a análise espectral, uma das técnicas usadas na análise dos dados obtidos.

3.1 GERAÇÃO DE ONDAS EM RIOS E EFEITOS SOBRE AS MARGENS

Para que uma onda seja gerada na superfície d'água, é necessária a presença de algum tipo de força agindo de forma contrária às ações da gravidade e da tensão superficial, já que estas últimas atuam de forma a nivelar a superfície. Essa força pode ser, por exemplo, uma rajada de vento. Uma vez que o impulso é dado, a gravidade e a tensão superficial agem favorecendo a propagação da onda (DEAN; DALRYMPLE, 1984, p. 2).

Diferentes magnitudes e velocidades de impacto produzem ondas de diversas formas e tamanhos. As ondas mais curtas podem ter menos do que um centímetro de comprimento. Através do tamanho das ondas pode se ter uma noção também da magnitude do fenômeno que está atingindo o corpo d'água (DEAN; DALRYMPLE, 1984, p. 2).

Conforme Marques (2005, p. 14), o surgimento das ondas ocorre da seguinte forma: “Para gerar uma onda é preciso que exista uma fonte de energia que, ao ser transmitida à água, produza um movimento oscilatório das partículas do líquido sem que haja transporte importante de massa.”.

Neste trabalho, pretende-se estudar o fenômeno ondulatório a fim de contribuir para os projetos de proteção de margens de rios. As margens são afetadas tanto pela ação de correntes, as quais provocam o desprendimento e o transporte do material constituinte, como pela ação das ondas, que intensificam o processo erosivo e se originam principalmente pelo

vento, pela operação de estruturas hidráulicas e por embarcações (BRIGHETTI; MARTINS, 2001, p. 3).

Ainda de acordo com Brighetti e Martins (2001, p. 3), a estabilização das margens dos rios é fundamental quanto aos seguintes aspectos:

O propósito fundamental da estabilização e proteção de margens, sob o ponto de vista hidráulico, é manter a seção do curso da água estável e dentro dos limites estabelecidos para sua utilização, seja como via de navegação, componente de um sistema de drenagem, aproveitamento hidrelétrico ou abastecimento de água.

3.1.1 Geração de ondas pelo vento

De acordo com Müller¹ (1995 apud D'ARMADA et al., 2011) que apresenta em seu trabalho o efeito erosivo provocado por ondas geradas pelo vento em reservatórios, a formação do fenômeno ondulatório é o resultado da combinação de diferenças de pressão atmosférica com a própria ação cisalhante do vento sobre a superfície da água.

Nos grandes reservatórios de hidrelétricas, os quais apresentam extensa área superficial, a formação de pistas de vento é mais significativa e facilita, portanto, a geração de ondas por vento. Sabe-se que o embate destas ondas pode provocar um processo erosivo de alta intensidade. Os fatores que devem ter maior relevância no desenvolvimento deste fenômeno são as características geotécnicas do talude, a posição do lençol freático, a configuração do relevo e a forma de uso e ocupação das margens (SIQUEIRA², 2011 apud D'ARMADA et al., 2011).

Para descrever a ação das ondas geradas por vento, Brighetti e Martins (2001, p. 17) considera os seguintes parâmetros:

A ação do vento sobre as superfícies livres provoca ondas cuja altura, período e velocidade de propagação são relacionadas à profundidade do escoamento e a velocidade do vento. Para águas profundas, a altura significativa é proporcional à profundidade y , velocidade do vento V e comprimento do *fetch* L_0 , que pode ser interpretado como sendo a pista de atuação do vento no sentido da formação das ondas. Em águas rasas, o efeito do atrito compete com a energia transferida pelo vento limitando a altura das ondas.

3.1.2 Geração de ondas por embarcações

¹ MÜLLER, A. C. **Hidrelétricas, meio Ambiente e desenvolvimento**. São Paulo: Makron Books, 1995.

² SIQUEIRA, A. G. Erosão em margens de reservatórios. **Revista ABGE**, n. 89, jan 2011.

A formação de ondas pela passagem de embarcações nos rios é citada por Brighetti e Martins (2001, p. 21): “O movimento das embarcações provoca ondas geradas pelo abaixamento da superfície líquida e ondas secundárias, provocadas pelo cruzamento de picos de diferentes frentes de ondas.”.

Diferentemente das ondas formadas pelo vento, que possuem cristas longas, as ondas de embarcações apresentam um padrão bi-dimensional visto em planta, propagando-se com forma fixa em direção à margem. Portanto, a incidência sobre o talude ocorre com um ângulo oblíquo. Quando elas aparecem esporadicamente, não representam grande risco, mas caso o volume do tráfego de embarcações seja intenso, pode ocorrer forte erosão. Neste caso, as alturas das ondas são mais elevadas, sendo diretamente proporcionais ao tamanho e frequência de passagem das embarcações. Dependendo do ângulo de incidência, as tensões cisalhantes são bem acentuadas (NEVES et al., 2006).

O primeiro estudo sobre esse fenômeno foi desenvolvido por Lord Kelvin. Ele chegou à conclusão de que, em águas profundas, qualquer objeto que se desloque com velocidade constante gera ondas confinadas em uma região com a forma de um V, com semi-ângulo igual a $19,5^\circ$ em relação ao eixo imaginário do curso da embarcação e se propagam em um ângulo de 35° em relação também a este eixo. Nessa região, surgem dois conjuntos distintos de ondas, um divergente e outro transversal. Modernamente, classificam-se as ondas de embarcação em função da profundidade relativa (relação entre profundidade e comprimento da onda) ou em relação ao número de Froude (NEVES et al., 2006).

3.1.3 Geração de ondas pela operação de estruturas hidráulicas

Durante a execução de projetos de estruturas hidráulicas, os engenheiros responsáveis sempre devem considerar processos erosivos que podem se desenvolver próximos a essas, principalmente a jusante da obra. A erosão tem origem na conversão da energia potencial em cinética, durante a queda da água dissipada pelo vertedouro. Para limitar os efeitos da liberação excessiva de energia cinética, é usado um dispositivo denominado dissipador de energia, que pode ser de vários tipos. O mecanismo de dissipação ocorre através do escoamento horizontal, do vertical, ou devido a uma combinação de ambos (ABOU-SEIDA, 1963, p. 134).

O alto número de barragens que vêm sendo construídas recentemente aumentou a preocupação sobre os efeitos a jusante dos vertedouros. Antes, a principal atenção era dada ao processo erosivo presente no contorno dos reservatórios, além do controle da área de inundação. A erosão nas margens de rios ocorre tanto pela ação contínua das correntes como também pode ser acentuada pelas ondas originadas imediatamente a jusante das barragens. As altas variações de descarga, devido à operação da estrutura hidráulica, são um fator potencializador do processo de arrancamento do material do leito, produzindo efeitos adversos sobre a vegetação ripária (COELHO, 2008, p. 24).

Além do prejuízo à vegetação presente nas margens, as ondas surgidas a jusante dos vertedouros podem comprometer a segurança das populações ribeirinhas e perturbar a navegação (PEREIRA; LOPES, 2013). De acordo com a *International Commission on Large Dams* (1989), estruturas que dependem da estabilidade do terreno ribeirinho, como pontes e tubulações próximas, são comprometidas com o processo de recalque ocorrido devido à erosão fluvial.

3.1.4 Variáveis relevantes no impacto de ondas em taludes

De acordo com Brea et al. (1990), para modelar fisicamente a ação ondulatória sobre um talude definem-se primeiramente os parâmetros dependentes e os independentes. Estes últimos devem caracterizar adequadamente a geometria do talude, as características do fluido e a própria ação da onda. Em relação ao talude, o autor citado considerou a inclinação m , a rugosidade k e uma profundidade de água d medida desde a base da estrutura. As propriedades da água utilizadas foram a massa específica ρ , o coeficiente de viscosidade dinâmico μ e a tensão superficial σ . Admitiu-se que as ondas incidem de forma normal ao talude, de modo que é suficiente considerar que o fenômeno ondulatório está definido por sua altura de onda incidente H_i e pelo período T . Para o caso da ação aleatória, é utilizada a altura significativa H_s , que é a média do terço superior das alturas das ondas amostradas; e como período toma-se o valor deste parâmetro correspondente à máxima densidade de energia do espectro T_p .

Já os parâmetros dependentes são a subida da onda R_u e a parcela refletida pela estrutura H_r . R_u foi definida como a altura alcançada pela onda sobre a estrutura, sendo medida verticalmente e referenciada no nível médio da água (BREA et al., 1990).

Devido ao grande número de variáveis envolvidas no processo, torna-se prático utilizar a técnica da análise dimensional. Utilizando o método de Buckingham (BATTJES³, 1974 apud BREA, 1990), obtiveram-se os seguintes grupos adimensionais:

- a) Ru/gT^2 : adimensional da altura de subida da onda na estrutura;
- b) Hr/H_i : coeficiente de reflexão da onda K_r ;
- c) H_i/gT^2 : inclinação da onda;
- d) H_i/d : profundidade relativa medida desde a base do talude até o nível médio da água;
- e) $\rho H_i^2/\mu T$: número de Reynolds Re ;
- f) $\rho H_i^3/\sigma T^2$: número de Weber We ;
- g) H_i/k : rugosidade relativa da proteção da margem.

Ainda de acordo com o mesmo autor, o parâmetro de maior significância dos resultados é a inclinação da onda H_i/gT^2 , sempre que o tamanho do modelo seja adequado para evitar efeitos de escala, que são função dos números de Weber e de Reynolds. Portanto, o critério de modelação mais adequado neste caso deve ser o froudiano, já que deve cumprir-se a relação $gT=(gH)^{0,5}$.

3.2 DISSIPADORES DE ENERGIA

Diversos tipos de dissipadores de energia e bacias de dissipação têm sido utilizados já há muitos anos. A operação dessas bacias depende muito da dissipação parcial da energia vinda de fluxos de alta velocidade, através da combinação dos seguintes métodos (ABOU-SEIDA, 1963):

- a) o atrito externo entre água e ar;
- b) o atrito externo entre o escoamento e o canal;
- c) o atrito interno;
- d) turbulência.

A função básica dos dissipadores de energia é converter energia cinética em turbulência e calor. A utilização do ressalto hidráulico sempre que possível é uma das práticas mais comuns. Ele se forma quando a água movendo-se em velocidade supercrítica e numa

³ BATTJES, J. A. **Wave run-up and overtopping**. La Haya, 1974.

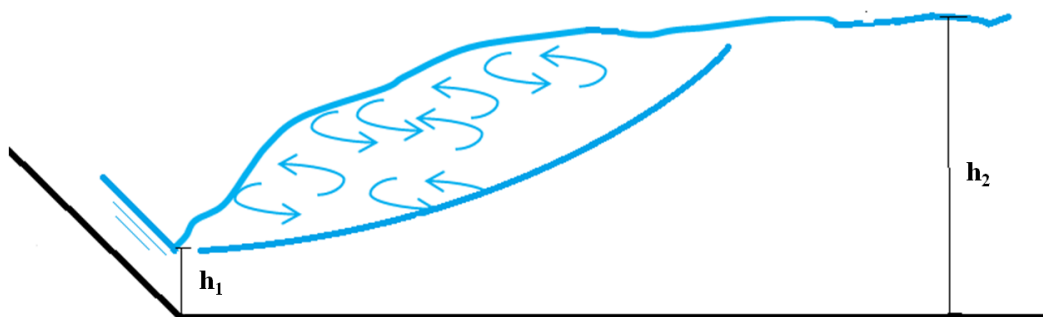
profundidade relativamente baixa impacta sobre um curso da água, tendo um substancial aumento na altura da corrente e uma conseqüente diminuição na sua velocidade (ABOUSEIDA, 1963).

Segundo Ortiz⁴ (1982 apud CONTERATO, 2014, p. 18), quando a água escoá pelo vertedouro da barragem, a energia estática do escoamento se converte em energia cinética, surgindo um fluxo de alta velocidade capaz de provocar grandes danos próximos à obra hidráulica. Os dispositivos capazes de conter o processo erosivo são os dissipadores de energia hidráulica. Os parâmetros fundamentais dos projetos dessas estruturas são o desnível a ser vencido, a vazão específica de projeto, a geologia do local e o nível de jusante. Classificam-se essas estruturas em dois tipos:

- a) grupo A: bacias de dissipação e estruturas especiais que têm a finalidade de conter a zona de dissipação de energia hidráulica;
- b) grupo B: estruturas projetadas para lançar o jato longe da obra. A dissipação se dá pelo impacto hidrodinâmico no leito do rio longe da estrutura, garantindo a segurança da mesma.

Conforme Conterato (2014), fazem parte do Grupo A as bacias de dissipação com formação de ressalto hidráulico (incluindo as que são inclinadas ou as que possuem elementos em seu interior), conchas de retenção e os vertedouros com capacidade de absorver parte da energia de queda, como o feito em degraus. Esse tipo de estrutura é favorável quando o valor da altura conjugada do ressalto h_2 é próximo da profundidade do rio a jusante da barragem (figura 2). Nessas condições, o ressalto fica localizado apenas na bacia de dissipação.

Figura 2 – Alturas conjugadas do ressalto hidráulico



(fonte: adaptado de CONTERATO, 2014)

⁴ ORTIZ, J. P. Macroturbulência de escoamento a jusante de estruturas de dissipação por ressalto. **Boletim técnico DAEE**. São Paulo. v. 5, n. 3, p. 273-472. 1982.

As estruturas do grupo B são aquelas que dependem de condições geológicas mais favoráveis para o seu uso. Como o leito do rio é o único responsável pela absorção da energia de queda, o processo erosivo deve ser mais intenso. Portanto, o dispositivo deve lançar o jato a uma distância segura da barragem. Um exemplo de obras desse tipo é o vertedouro salto esqui. (CONTERATO, 2014)

O vertedouro em degraus caracteriza-se pela maior dissipação de energia ao longo de sua calha, se comparado ao vertedouro liso. Conforme Sanagiotto (2003), essa estrutura começou a ser utilizada na Antiguidade, devido a sua forma simples e boa estabilidade. O uso de degraus era associado a menores velocidades e, conseqüentemente, a uma sensível diminuição do desgaste da estrutura.

O escoamento nesse vertedouro pode ocorrer das seguintes formas:

- a) escoamento em quedas sucessivas: geralmente ocorre em vertedouros de baixa declividade e com menores vazões. Segundo Chanson⁵ (1995 apud SANAGIOTTO, 2003), o jato proveniente do degrau anterior impacta no próximo (imediatamente a jusante), com ou sem a formação do ressalto hidráulico;
- b) escoamento deslizante sobre turbilhões: caracteriza-se pela formação de um jato principal, que passa sobre turbilhões localizados nos cantos externos dos degraus. Esse tipo de escoamento é característico de estruturas com grandes declividades e maiores vazões específicas. (CHANSON⁶ 1994 apud SANAGIOTTO 2003).

3.2.1 Dissipação por ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico é um fenômeno de variação rápida que ocorre em um escoamento à superfície livre. Corresponde a uma transição descontínua de um regime supercrítico para o subcrítico dentro de um canal aberto. É, portanto, um fenômeno claramente turbulento, com curvatura significativa das linhas de corrente e incorporação de ar na massa líquida. O ressalto livre sobre uma bacia plana é utilizado como um importante amortizador em obras hidráulicas, principalmente devido à perda localizada de energia cinética (LOPARDO; VERNET, 1979).

⁵ CHANSON, H. Energy dissipation on stepped spillways. Discussion. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 121, p. 80-82, 1995.

⁶ CHANSON, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, Delft, v. 32, n. 3, p. 445-460, 1994.

O ressalto já foi e continua sendo alvo de numerosas investigações científicas, porém a contribuição para o estudo das ondas progressivas geradas a jusante ainda é muito escassa. Tais ondas podem percorrer grandes distâncias nos canais de restituição (LOPARDO; VERNET, 1979).

Segundo esses mesmos autores, no ressalto livre, que pode ser reproduzido em laboratório dentro de um canal de seção retangular sobre trecho horizontal, a superfície livre se eleva bruscamente na seção de entrada (que oscila em torno de uma posição média) e continua crescendo até o encontro com o nível de restituição (ou altura de jusante após o ressalto hidráulico). As profundidades de entrada h_1 (logo após o impacto do jato) e de saída h_2 (encontro do ressalto com o nível do escoamento) são denominadas alturas conjugadas (figura 2).

Desprezando as perdas de energia devido à fricção, a equação de conservação da quantidade de movimento permite deduzir com facilidade a relação entre as alturas conjugadas, chegando-se na equação 1:

$$h_2/h_1 = 1/2*((1+8Fr_1^2)^{0.5}-1) \quad (\text{equação 1})$$

Onde Fr_1 é o número de Froude incidente no ressalto, definido como (LOPARDO; VERNET, 1979):

$$Fr_1 = U_1/((gh_1)^{0.5}) \quad (\text{equação 2})$$

Sendo:

U_1 = velocidade incidente do jato no fundo do leito;

g = aceleração da gravidade.

A equação que expressa a relação entre as alturas conjugadas é denominada equação de Bélanger. O fato de desprezar a fricção foi bastante discutido em décadas passadas. Pôde-se constatar uma diferença muito pequena nas relações h_2/h_1 medidas e a citada na expressão teórica, atribuída a erros experimentais e nas indeterminações lógicas na definição das alturas

conjugadas. Portanto, admite-se que essa expressão gera resultados com boa aplicabilidade prática (LOPARDO; VERNET, 1979).

A equação 1 também mostra que a razão entre h_1 e h_2 é uma função do número de Froude, de tal forma que os dois parâmetros possuem uma relação quase que linear entre si. Ela pode ser aplicada quando a vazão a montante chega ao ressalto formando um considerável ângulo com a horizontal (PETERKA, 1958).

Segundo a lei da semelhança, em que as forças de gravidade predominam, como no caso de canais abertos, o número de Froude deve ter o mesmo valor para modelo e protótipo. Portanto, um ressalto no modelo de canal aberto tem características semelhantes às do ressalto em protótipo, se o número de Froude do fluxo a montante do ressalto for o mesmo. Embora a conversão de energia em um ressalto hidráulico tenha relação também com o número de Reynolds, o número de Froude torna-se mais útil para a caracterização de uma bacia de amortecimento, devido ao predomínio das forças gravitacionais. Bakhmeteff e Matzke⁷ (1936 apud PETERKA, 1958) demonstraram isso quando eles relacionaram as características de uma bacia de dissipação com o número de Froude elevado ao quadrado, $U_1^2/(g h_1)$, o qual eles denominaram fator cinético da vazão.

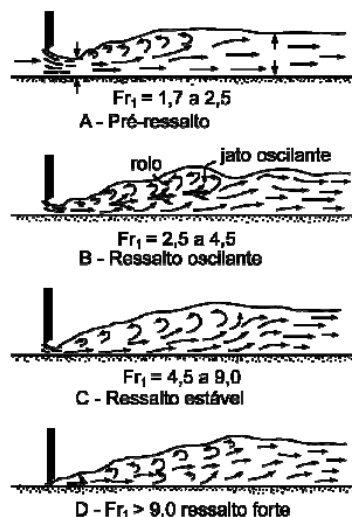
Em alguns de seus experimentos, Peterka (1958) teve como objetivo manter o começo do ressalto hidráulico na seção de impacto do jato. Quando a profundidade a jusante sofre pequenas diminuições, o ressalto hidráulico tende a se desprender desta seção, alterando desta forma a sua posição na bacia. Isto ocorre para os valores mais altos e mais baixos do número de Froude. No entanto, essa variação não ocorreu para valores de Fr_1 entre 4,5 e 9.

O mesmo autor também incluiu em seus estudos a capacidade de absorção da energia de impacto pelo ressalto hidráulico. Destaca-se que para um número de Froude igual a 2, que corresponderia a um jato de baixa velocidade e de maior espessura, a energia absorvida fica em torno de 7% da energia de queda. Por outro lado, para um número de Froude de 19, provavelmente produzido por um jato de pequena espessura e em alta velocidade, o ressalto absorveu em torno de 85% da energia de queda. Além disso, esse fenômeno possui diversas variações de ocorrência.

⁷ BAKHMETEFF, B. A.; MATZKE, A. E. The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity. **Transactions ASCE**, v. 101, p. 630, 1936.

O ressalto hidráulico pode ocorrer de quatro formas distintas sobre uma superfície horizontal, como mostra a figura 3. Todas são encontradas na prática. As características internas e a absorção de energia variam com cada forma. Pode-se classificá-las em função do número de Froude (PETERKA, 1958).

Figura 3 – Classificação do ressalto hidráulico em função do número de Froude



(fonte: adaptado de PETERKA, 1958)

Quando o número de Froude é unitário, a água está escoando na profundidade crítica. Não há condições para o ressalto se formar. Para valores do número de Froude entre 1 e 1,7, há apenas uma leve diferença entre as profundidades conjugadas h_1 e h_2 . Surge então uma pequena agitação sobre a superfície da água, o que diferencia esse caso do escoamento crítico. Quando o número de Froude se aproxima de 1,7, uma série de pequenos rolos se desenvolvem no ressalto sobre o leito, como indicado na figura 3A. Essa ação permanece inalterada, mas com cada vez mais intensidade até o fluxo atingir o valor número de Froude igual a 2,5. Nessa faixa, geralmente não se encontram, na prática, problemas relacionados à bacia de dissipação. Isso ocorre provavelmente porque a superfície da água é regular e a velocidade por toda a seção transversal pode ser considerada uniforme. A perda de energia neste caso é em torno de 20% (PETERKA, 1958).

Quando o número de Froude atinge valores de 2,5 a 4,5, nota-se a formação de uma ação pulsatória, usualmente vista em estruturas de baixa queda. A vazão de chegada oscila desde o fundo do canal até a superfície, sem regularidade quanto ao período. Cada oscilação gera uma onda a jusante do ressalto que pode percorrer quilômetros de distância (figura 3B). Essa onda

ainda pode sofrer modificações durante seu trajeto, quando passa por pilares de pontes ou curvas, onde ocorre a reflexão (PETERKA, 1958).

O ressalto hidráulico passa a ter uma maior estabilização quando o número de Froude atinge valores de 4,5 a 9, como pode ser visto na figura 3C. Nela, visualiza-se que a seção vertical onde o jato de alta velocidade se afasta do fundo é a mesma da superfície mais a jusante do rolo formado no impacto (PETERKA, 1958).

Já para valores do número de Froude acima de 9, o ressalto altera gradualmente sua forma (figura 3D). Como a vazão de entrada possui alta velocidade, a altura h_1 é menor, e a diferença entre as alturas conjugadas passa a ser significativa. O fator determinante do comprimento do ressalto é a superfície a jusante do rolo formado no impacto. Esses valores do número de Froude não são exatos, mas possuem uma boa abrangência dependendo das condições locais (PETERKA, 1958).

Ainda na mesma obra, cita-se que a ação ondulatória não é tão pronunciada em grandes estruturas, onde as ondas podem percorrer diversas direções. Nesse caso, a dissipação pode ocorrer em pequenas ou grandes distâncias. Quando se trata de canais de descarga com mais de 50 pés de altura, nos quais o número de Froude está no intervalo de 2,5 a 4,5, é indispensável o estudo em modelo físico para garantir uma operação segura da barragem.

3.2.2 Ondas geradas por ressalto hidráulico

As alturas e períodos de ondas geradas em canais que utilizam a descarga por ressalto hidráulico dependem das características destes, em consequência do número de Froude a montante Fr_1 . As amplitudes das ondas estão representadas pela média do terço superior das mesmas H_s (altura significativa) e os períodos pelo pico T_p , calculado pelo inverso da frequência dominante (LOPARDO; VERNET, 1979).

Nos ensaios realizados por Lopardo e Vernet (1979), foram utilizadas pontas linimétricas com precisão de 0,1 mm para medição do nível da água em repouso. Para detectar variações rápidas na superfície livre produzidas pelas ondas, fez-se uso de um sensor resistivo construído no próprio laboratório, junto a um eletrodo que corrigia a medida de acordo com a temperatura e salinidade da água.

Os mesmos autores tiveram como foco em seu trabalho definir relações funcionais que permitissem o cálculo das ondas de água geradas a jusante do ressalto livre em um canal retangular de fundo horizontal, onde a altura de água a jusante coincidia com a altura conjugada. Foi aplicada a análise espectral nos registros experimentais considerados mais relevantes, de modo a definir estatisticamente o processo de oscilação da superfície livre. Também foram realizados experimentos com ressalto submerso, com a intenção de constatar o grau em que a existência de níveis de jusante superiores à altura conjugada afeta as ondas em estudo.

Ainda conforme Lopardo e Vernet (1979), a utilização da análise dimensional permitiu chegar nas seguintes expressões básicas:

$$H_s/h_1 = F_1 (Fr_1, hr/h_1, X/h_1) \quad (\text{equação 3})$$

$$U_1 * T_p/h_1 = F_2 (Fr_1, hr/h_1, X/h_1) \quad (\text{equação 4})$$

Sendo:

U_1 = velocidade incidente no ressalto;

H_s = altura significativa;

hr = profundidade de restituição (ou profundidade do rio após o ressalto);

X = distância do começo do ressalto até o ponto de medição;

h_1 = altura conjugada a montante;

T_p = período de pico;

Fr_1 = número de Froude calculado na entrada do ressalto.

Considerou-se mais adequado substituir os parâmetros, hr/h_1 e X/h_1 por S e $X/\Delta L_1$, respectivamente. Enquanto ΔL_1 é o comprimento do ressalto hidráulico, S foi denominado índice de submergência, calculado da seguinte maneira (LOPARDO; VERNET, 1979):

$$S = (hr-h_2)/h_2 \quad (\text{equação 5})$$

Sendo:

h_2 = altura conjugada a jusante.

Na primeira parte da pesquisa, os autores realizaram os ensaios com $X/\Delta L_1$ constante e utilizaram apenas o ressalto livre, para que os parâmetros de altura e período da onda dependessem apenas do número de Froude a montante, este variando de 2,16 a 6,80. Pela realização de 14 ensaios com essa faixa do número de Froude, e através da representação dos resultados graficamente, a seguinte fórmula de dependência de H_S/h_1 em relação a Fr_1 foi obtida:

$$H_S/h_1 = 1/6 * (Fr_1-1) \quad (\text{equação 6})$$

Os resultados obtidos para o período de pico também foram representados graficamente. O parâmetro $(U_1 * T_P/h_1)$, mostrado a seguir, é oriundo do número de Strouhal, que na mecânica dos fluidos relaciona a oscilação com a velocidade média. Desta vez, foi obtida uma equação exponencial, válida para Fr_1 de 1 a 6 (LOPARDO; VERNET, 1979):

$$U_1 * T_P/h_1 = 6(Fr_1-1)^{1,42} \quad (\text{equação 7})$$

Onde:

U_1 = velocidade incidente no ressalto;

h_1 = altura conjugada a montante;

T_P = período de pico;

Fr_1 = número de Froude calculado na entrada do ressalto.

Peterka (1958) observou que as ondas geradas a jusante de dissipadores a ressalto são de amplitudes e períodos irregulares, e dedicaram seus estudos a elementos que possam atenuar o fenômeno ondulatório.

No trabalho de Abou-Seida (1963), a proposta da investigação foi estudar as características de ondas progressivas a jusante de vertedouros sob condições variáveis de descarga, profundidade a jusante e inclinação do leito. O autor também cita que essas características dependem do tipo de dissipador de energia utilizado a jusante do vertedouro.

De acordo com os ensaios de Elevatorski⁸ (1959 apud ABOU-SEIDA, 1963), as ondas geradas a jusante de ressalto hidráulico são irregulares em relação à altura e ao período. Um dos propósitos do estudo foi investigar o comportamento estatístico das alturas das ondas. Os principais objetivos foram determinar as relações entre as características do fluxo a montante dos dissipadores de energia, a profundidade a jusante, a inclinação do leito e as ondas induzidas a jusante do canal.

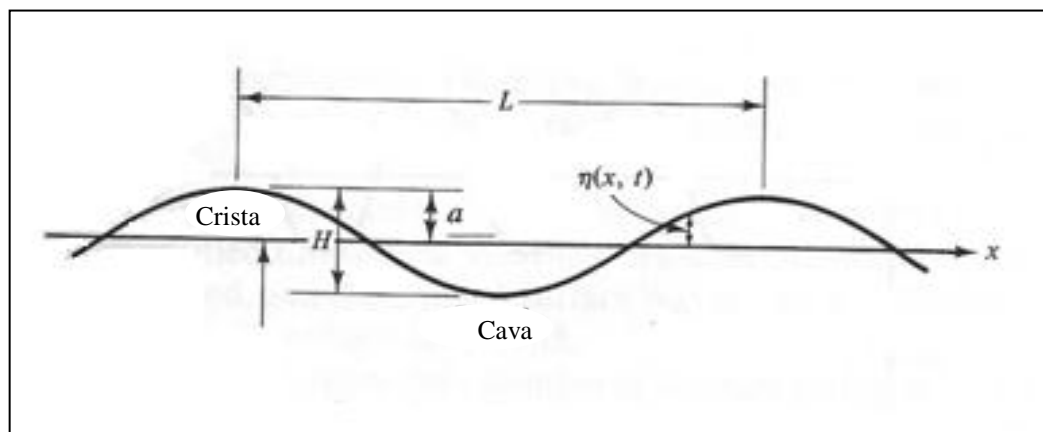
A altura significativa de onda utilizada também foi aquela comum na prática da engenharia costeira. Determinou-se o seu valor correspondente, H_s , assim como a porcentagem de ocorrência para esta ou para ondas menores, de acordo com as distribuições estatísticas analisadas. Foi concluído que a altura significativa é aquela maior que 87 a 95 % da amostra. Portanto, H_s foi selecionado como o parâmetro que talvez deva ser o mais usado para propostas de projetos (ABOU-SEIDA, 1963).

3.3 ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DAS ONDAS

Conforme Dean e Dalrymple (1984), os principais parâmetros utilizados para descrever o movimento das ondas são o comprimento, a altura e a profundidade da água na qual elas se propagam. Todos os outros parâmetros, como a velocidade e a aceleração induzidas na água podem ser calculados a partir dessas variáveis. Na figura 4, é mostrado um esquema bidimensional da propagação da onda em relação ao eixo horizontal. O comprimento horizontal da onda é representado pela variável L , medida entre duas cristas ou cavas sucessivas. A partir de L e do período T , que é o tempo necessário para que duas cristas ou cavas sucessivas passem por um determinado ponto, define-se a velocidade da onda, denominada celeridade e definida por $C=L/T$.

⁸ ELEVATORSKI, K. **Hydraulic Energy Dissipators**. New York: McGraw-Hill, 1959.

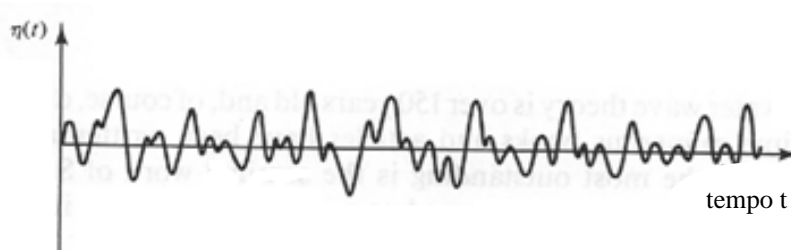
Figura 4 – Características da onda



(fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1984)

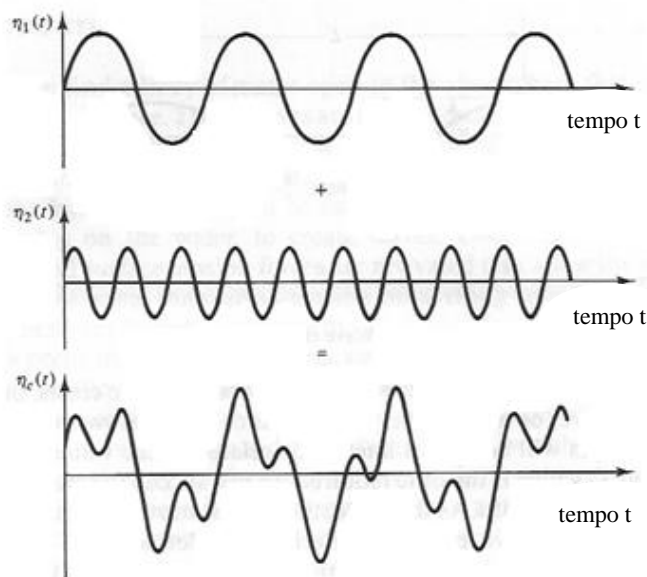
As ondas na natureza raramente se repetem ou se propagam na mesma direção. No caso de uma medição no oceano, por exemplo, obtém-se um resultado similar ao da figura 5, que representa a elevação da superfície d'água em função do tempo. Este tipo de amostragem pode ser interpretado como uma superposição de senóides em diferentes direções. Na figura 6, são mostrados 3 gráficos, dois representando o sinal de uma única onda e o mais abaixo, a superposição dos dois sinais. A soma de funções seno permite a utilização de técnicas como a análise espectral para a descrição do fenômeno ondulatório no mar. Devido à grande aleatoriedade vista no mar, são necessárias técnicas estatísticas. Porém, para o caso de ondas com grande altura ou para aquelas presentes em águas de pouca profundidade, nota-se uma maior regularidade, o que possibilita a descrição de cada onda por uma determinada função seno (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

Figura 5 – Exemplo de um registro ondulatório do oceano



(fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1984)

Figura 6 – Forma da onda resultante da soma de duas senóides



(fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1984)

3.3.1 Ondas de pequena amplitude

A teoria para o estudo do desenvolvimento da onda considera que os efeitos viscosos estão usualmente concentrados em camadas limites finas, próximas ao fundo e à superfície. Por isso, pode-se afirmar que o corpo do fluido não tem movimento rotacional. Considerando a água como um fluido incompressível, é possível chegar a uma função para descrever o fluxo e o potencial de velocidades das ondas (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

O movimento da superfície de ondas progressivas e o potencial de velocidades podem ser descritos pelas seguintes equações (DEAN; DALRYMPLE, 1984):

$$\eta(t) = (H/2) * \cos(k_0 x - \sigma_0 t) \quad (\text{equação 8})$$

$$\phi(x,z,t) = -(H/2) * (g/\sigma_0) * (\cosh k_0 (h+z) / (\cosh k_0 h)) * \sin(k_0 x - \sigma_0 t) \quad (\text{equação 9})$$

Onde:

η = deslocamento vertical da superfície;

ϕ = potencial de velocidades;

H = a altura da onda;

σ_0 = frequência angular da onda;

t = instante de tempo considerado;

k_0 = constante conhecida como o número de onda ($k_0 = 2\pi/L$);

x = distância medida na direção da propagação da onda;

z = coordenada vertical medida a partir do nível de repouso;

g = aceleração da gravidade;

h = altura de água medida a partir do nível de repouso.

Derivando a equação do potencial de velocidades, em relação aos eixos horizontal (x) e vertical (z), obtêm-se as seguintes definições, que representam as velocidades da onda V_x e V_z nas direções horizontal e vertical, respectivamente:

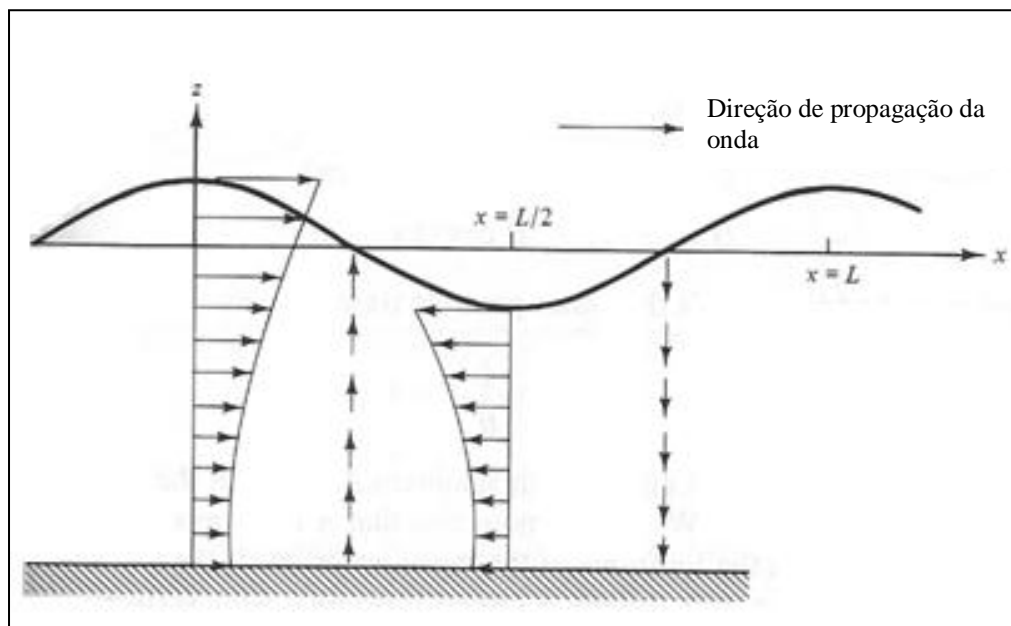
$$V_x = (H/2) * \sigma_0 * ((\cosh k_0 (h+z)) / (\sinh k_0 h)) * \cos(k_0 x - \sigma_0 t) \quad (\text{equação 10})$$

$$V_z = (H/2) * \sigma_0 * \sinh k_0 (h+z) / \sinh k_0 h * \sin(k_0 x - \sigma_0 t) \quad (\text{equação 11})$$

Analisando as equações acima, nota-se que os valores extremos da velocidade nas componentes horizontal e vertical ocorrem fora de fase. Os componentes horizontais máximos ocorrem nas regiões da crista e da cava, enquanto que as maiores velocidades verticais surgem no nível de repouso da superfície (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

A figura 7 mostra as componentes da velocidade em quatro fases da onda. A aceleração vertical máxima ocorre quando a velocidade horizontal é máxima e, da mesma forma, o maior módulo da aceleração horizontal aparece quando a velocidade vertical atinge o seu pico.

Figura 7 – Perfil de velocidades de uma partícula de água dentro de uma onda progressiva



(fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1984)

Segundo os mesmos autores, as pressões induzidas pelas ondas provocam o deslocamento do fluido. Uma partícula da água, com posição (x_1, z_1) , ao ser impulsionada, tem sua nova posição instantânea descrita por $(x_1 + \zeta, z_1 + \xi)$. As componentes de deslocamento ζ (horizontal) e ξ (vertical) podem ser obtidas integrando as equações das componentes da velocidade em relação ao tempo (DEAN E DALRYMPLE, 1984):

$$\zeta = - (H/2) * (gk_0/\sigma_0^2) * (\cosh k_0 (h+z_1)/\cosh k_0 h) * \sin (k_0 x_1 - \sigma_0 t) \quad (\text{equação 12})$$

$$\xi = (H/2) * (\sinh k_0 (h+z_1)/\sinh k_0 h) * \cos (k_0 x_1 - \sigma_0 t) \quad (\text{equação 13})$$

Onde:

H = a altura da onda;

σ_0 = frequência angular da onda;

t = instante de tempo considerado;

k_0 = constante conhecida como o número de onda ($k_0 = 2\pi/L$);

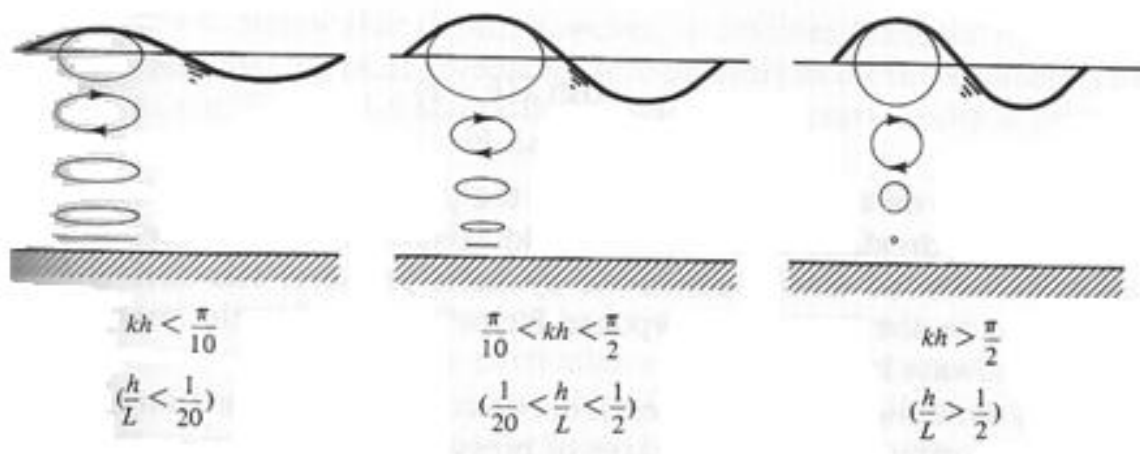
x_1 = posição inicial em relação ao eixo horizontal ;

z_1 = posição inicial em relação ao eixo vertical;

h = altura de água medida a partir do nível de repouso.

A figura 8 representa a forma da trajetória de uma partícula da onda de acordo com a relação h/L , conhecida como profundidade relativa. Se a partícula se encontra em águas rasas, h/L é menor do que 0,05, e o deslocamento ocorre em um formato elíptico. Para águas intermediárias, $0,05 < h/L < 0,5$. Quando se trata de águas profundas, h/L deve ser maior do que 0,5, e cada elemento então percorre um caminho praticamente circular. Quanto menor a profundidade, menor a dimensão desse círculo, o qual decai exponencialmente (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

Figura 8 – Trajetórias de uma partícula de água dentro de ondas progressivas com diferentes profundidades relativas



(fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1984)

A energia envolvida durante a propagação da onda é de dois tipos: a energia potencial, resultante do deslocamento da superfície livre; e a energia cinética, presente no movimento do fluido. A análise da energia total presente no fenômeno ondulatório ao longo do percurso é fundamental em diversas áreas de estudo, como por exemplo, no entendimento de como ocorre a propagação em direção às margens (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

Considerando ondas progressivas, a energia do fluxo por unidade de área superficial e devida apenas às ondas é dada pela equação 14. Nota-se que a energia não depende da profundidade da água e nem do comprimento da onda. É função apenas do quadrado da altura da onda.

$$E = \rho * g * H^2 / 8 \quad (\text{equação 14})$$

Onde:

E = energia do fluxo por unidade de área superficial;

ρ = massa específica da água;

g = aceleração da gravidade;

H = altura da onda.

Consistidas geralmente de partículas com trajetórias fechadas, as ondas de pequena amplitude não transmitem massa quando se propagam. Entretanto, elas transmitem energia. Considerando a teoria linear, a taxa de transferência da energia, representada pela letra \mathcal{E} é definida por (DEAN; DALRYMPLE, 1984):

$$\mathcal{E} = E * C * n \quad (\text{equação 15})$$

Sendo:

E = energia da onda;

C = velocidade da onda definida por σ/k ;

n = fator de transmissão da energia da onda.

O fator n define a parcela da energia do movimento ondulatório que é transmitida, sendo calculado da seguinte forma (DEAN; DALRYMPLE, 1984):

$$n = 1/2 * (1 + (2k_0 h) / (\sinh 2k_0 h)) \quad (\text{equação 16})$$

Sendo:

k_0 = constante conhecida como o número de onda ($k_0 = 2\pi/L$);

h = altura de água medida a partir do nível de repouso.

Na mesma obra, verifica-se pela equação acima que, em águas profundas, onde n assume o valor de 0,5, a energia é transmitida a apenas metade da velocidade da onda, enquanto em

águas rasas, com n igual a 1, a taxa de transferência da energia do movimento ocorre na mesma velocidade com que a própria onda percorre o seu trajeto.

3.3.2 Modelagem física

Um modelo físico é um sistema de simulação das condições físicas reais, usualmente em tamanho reduzido, de modo que as forças consideradas dominantes sejam reproduzidas na mesma proporção (HUGHES, 1993).

Conforme Dalrymple⁹ (1985 apud HUGHES, 1993), as vantagens do uso de modelos físicos são:

- a) a possibilidade de reunir e aplicar as equações que governam o fenômeno em estudo sem ter que fazer algumas simplificações, as quais são necessárias em modelos numéricos ou analíticos.
- b) considerando que coletar informações no campo pode ser mais difícil e caro de se efetuar, o pequeno tamanho dos modelos permite a obtenção dos dados com custo reduzido e de forma a abranger todo o fenômeno.

Outras vantagens ainda são o grau de controle do experimento, onde pode-se simular as mais variadas condições (de acordo com os interesses do pesquisador), e a possibilidade de visualizar o processo físico ocorrendo, permitindo ao pesquisador realizar uma análise qualitativa durante o período de ensaios (HUGHES, 1993).

Como desvantagens do uso dessa ferramenta, destacam-se as seguintes (HUGHES, 1993):

- a) efeitos de escala: ocorrem em modelos menores que o protótipo. Em modelos na engenharia costeira, por exemplo, as forças viscosas são relativamente maiores no protótipo.
- b) efeitos de laboratório: são aqueles que não possibilitam uma aproximação adequada do protótipo, por exemplo, quando o tamanho do modelo tem um impacto grande. Um efeito comum de laboratório aparece quando são geradas ondas unidimensionais para simular ondas de diversas direções que ocorrem na prática.

Um dos primeiros passos na análise de um fenômeno físico é decidir quais são as variáveis relevantes para o estudo. Se houver um grande número destas variáveis, estabelecer as

⁹ DALRYMPLE, R. A. **Introduction to Physical Models in Coastal Engineering**. The Netherlands: Balkema, 1985. p. 3-9.

relações entre elas pode envolver um grande número de experimentos. A técnica da análise dimensional permite combinar as variáveis físicas em grupos adimensionais. Os passos para realizar este procedimento são os seguintes (HUGHES, 1993):

- a) identificar as variáveis independentes;
- b) decidir as variáveis dependentes;
- c) determinar quantos grupos adimensionais podem ser formados;
- d) efetuar a redução do sistema de incógnitas.

3.3.2.1 Condições de Semelhança

A condição de semelhança ocorre quando todos os parâmetros de maior relevância do fenômeno estão em proporção na relação modelo e protótipo. Os principais pré-requisitos para semelhança podem ser de três tipos: Semelhança Geométrica, Semelhança Cinemática e Semelhança Dinâmica (HUGHES, 1993).

Para serem geometricamente semelhantes, modelo e protótipo devem ter todas as razões entre as dimensões lineares correspondentes iguais. Essa semelhança independe de qualquer tipo de movimento que venha ter, ou seja, envolve única e exclusivamente a forma do modelo e do protótipo (WARNOCK¹⁰, 1950 apud HUGHES, 1993).

A semelhança cinemática se refere ao movimento entre as partículas do modelo e do protótipo. O movimento é definido como qualquer diferencial de comprimento em relação ao tempo. A semelhança cinemática é obtida quando a razão entre as componentes vetoriais do protótipo e do modelo é igual para todas as partículas em todos os momentos (HUDSON¹¹ et al., 1979 apud HUGHES, 1993).

A condição de semelhança dinâmica é mais complexa. Modelo e protótipo são dinamicamente semelhantes quando os valores absolutos das massas e das forças estão numa razão fixa entre os dois sistemas (HUGHES, 1993).

¹⁰ WARNOCK, J. E. **Hydraulic Similitude**. New York: H. Rouse, John Miley & Sons, 1950. p. 136-176.

¹¹ HUDSON, R. Y.; HERRMANN, F. A.; SAGER, R. A.; WHALIN, R. W.; KEULEGAN, G. H.; CHATHAM, C. E.; HALES, L. Z. **Coastal Hydraulic Models**. Vicksburg, Mississippi: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1979.

3.3.2.2 Condições de Semelhança Hidráulica

Segundo Munson¹² et al. (1990, apud HUGHES, 1993) a maioria dos estudos em engenharia envolve hipóteses simplificadas, sendo necessário encontrar um equilíbrio entre a precisão e a simplificação do problema. Além disso, existem forças que são insignificantes no protótipo, mas que podem ter uma influência considerável no modelo. Por exemplo, a tensão superficial geralmente tem pouca importância no protótipo, mas grande influência nos processos hidráulicos do modelo. Quando isto ocorre, o modelo é dito ter efeito de escala.

Considerando o critério hidráulico, a maioria dos problemas podem ser simplificados de forma a considerar a ação recíproca de apenas duas forças dominantes, permitindo desta maneira que os critérios de semelhança possam ser desenvolvidos teoricamente (WARNOCK¹³, 1950, apud. HUGHES, 1993). Vários critérios para modelo de fluidos foram desenvolvidos com base na suposição de que duas forças dominam o fluxo enquanto as outras forças, também existentes no problema, possuem menos influência (HUGHES, 1993).

As forças inerciais são sempre consideradas nos critérios de semelhança hidráulica, devendo ser equilibradas por uma das outras forças existentes. Nos critérios hidráulicos mais conhecidos, como os de Froude, Reynolds e Weber a força inercial é relacionada com as forças gravitacional, de viscosidade e da tensão superficial, respectivamente. (HUGHES, 1993).

As equações 17, 18 e 19 estabelecem as relações do critério de Froude:

$$\frac{V_M}{V_P} = \lambda^{\frac{1}{2}} \quad (\text{equação 17})$$

$$\frac{Q_M}{Q_P} = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad (\text{equação 18})$$

¹² MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F. OKIISHI, T. H. **Fundamentals of Fluid Mechanics**. New York: John Wiley & Sons, 1990.

¹³ WARNOCK, J. E. **Hydraulic Similitude**. New York: H. Rouse, John Miley & Sons, 1950. p. 136-176.

$$\frac{q_m}{q_p} = \lambda^{\frac{3}{2}} \quad (\text{equação 19})$$

Onde:

V_M = velocidade de escoamento no modelo;

V_P = velocidade de escoamento no protótipo;

Q_M = vazão do modelo;

Q_P = vazão do protótipo;

q_m = vazão específica do modelo;

q_p = vazão específica do protótipo;

λ = relação entre as escalas geométricas de modelo e de protótipo.

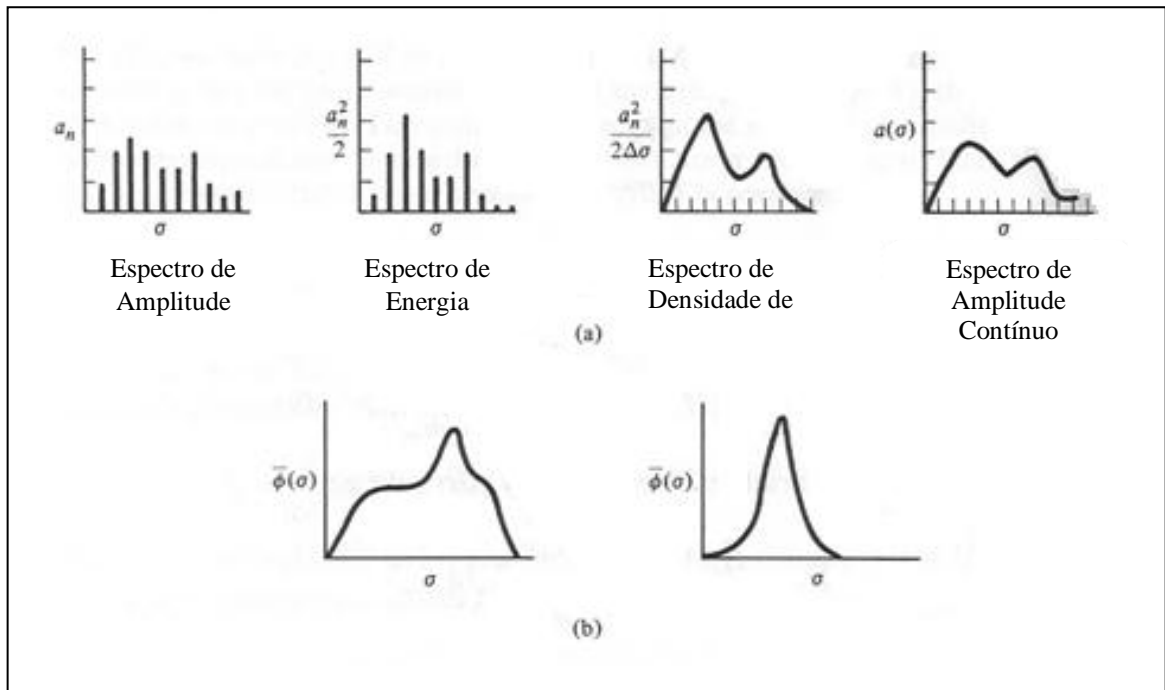
3.4 ANÁLISE ESPECTRAL

Quando se trata de uma superfície marítima, composta de numerosas ondas com diferentes direções e frequências, o engenheiro deve projetar uma determinada estrutura para a altura máxima de onda possível, ou outra altura que satisfaça as condições de projeto. Normalmente utiliza-se a altura significativa, que é a altura média do terço superior das ondas de uma amostra obtida (DEAN; DALRYMPLE, 1984).

Conforme os mesmos autores, a geração de espectros a partir de registros ondulatórios era, nos anos 80, um campo ainda em evolução na engenharia. Tendo como base a série de Fourier, a principal premissa para essa análise é a de que qualquer função $f(t)$ periódica pode ser representada por uma soma de senos e cossenos, dentro de um intervalo $(t, t+T)$.

Com os dados de frequência e amplitude, podem-se gerar os espectros representados na figura 9. Na parte a), visualiza-se os espectros de amplitude e de energia, sendo os dois mais à esquerda discretizados. À direita, pode-se destacar o espectro da densidade de energia, geralmente mais utilizado, do qual se mede a energia total da onda através da área sob a curva. Na parte b), são mostrados dois gráficos, onde verificam-se duas variações da forma do espectro. (DEAN; DALRYMPLE, 1984). O eixo horizontal representa a frequência, enquanto que nas ordenadas a resposta pode ser em amplitude ou em energia.

Figura 9 – (a) tipos de espectro;
 (b) espectros de energia com faixa larga (à esquerda) e estreita (à direita)



(fonte: adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1984)

A equação para definir o movimento da superfície, definida a partir da técnica de Fourier, é mostrada a seguir (BOUWS et al., 1998):

$$\eta(t) = \eta_o + \sum_{j=1}^i a_j \text{sen}(j\sigma_0 t + \phi_j) \quad (\text{equação 20})$$

Onde:

η = elevação da superfície livre no instante t ;

η_o = elevação média da superfície livre;

a_j = amplitude da onda;

σ_0 = frequência angular da onda;

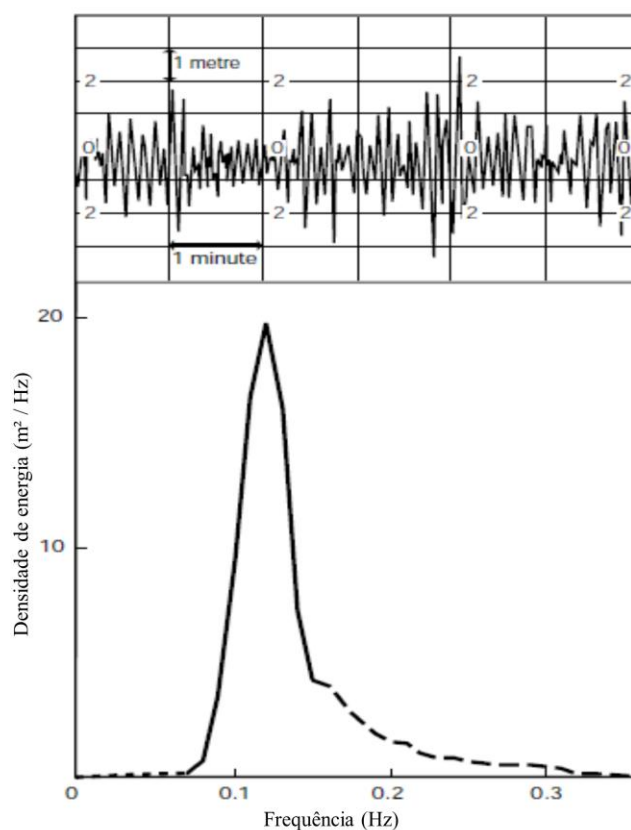
ϕ_j = ângulo de fase da onda;

i = número total de ondas.

Com o somatório dos valores de amplitude (a_j) elevados ao quadrado, obtém-se a função variância da elevação da superfície livre, $S(f)$. A função $S(f)$ é conhecida como espectro de

variância da onda. A figura 10 apresenta um espectro típico da agitação marítima, onde as amplitudes elevadas ao quadrado de cada componente de onda são representadas graficamente em função das suas frequências correspondentes (BOUWS et al., 1998).

Figura 10 – Exemplo de um espectro com registro da agitação marítima



(fonte: adaptado de LAING et al., 1998)

Os espectros eram inicialmente expressos em termos de E (energia da onda) e chamados de espectros de energia das ondas. No entanto, tornou-se prática comum desconsiderar o termo ρg e utilizar a energia como sendo $\alpha^2/2$ (demonstrado a seguir). Desta forma, o espectro de energia é considerado também como sendo um espectro de variância (BOUWS et al., 1998).

Os parâmetros obtidos de uma análise espectral são similares aos derivados de uma análise estatística. O momento de ordem n , m_n (que expressa a forma do espectro), é definido através da equação:

$$m_n = \int_0^{\infty} f^n E(f) df \quad (\text{equação 21})$$

Onde:

$E(f)$ = a densidade de variância, em função da frequência f .

A definição de m_n resulta que, o momento de ordem zero, m_0 , representa a área abaixo da curva espectral. Considerando a forma finita da curva, chega-se na seguinte expressão (BOUWS et al., 1998):

$$m_0 = \sum_{j=0}^i \frac{\alpha_j^2}{2} = \frac{\alpha^2}{2} \quad (\text{equação 22})$$

Sendo:

α_j = amplitude da onda.

Desta maneira a variância total do registro ondulatório é obtida pelo somatório das variâncias de cada uma das componentes individuais do espectro. Esta área tem por isso um significado físico, usado em aplicações práticas, que permite a definição da altura de onda a partir do espectro (BOUWS et al., 1998).

Se substituir agitação da superfície da água por apenas uma onda simples senoidal, que tenha a mesma energia, a altura desta onda seria dada por:

$$H_{rms} = (8 E / (\rho g))^{0,5} \quad (\text{equação 23})$$

Onde:

H_{rms} = a altura média quadrática, que representa a energia total por unidade de área;

E = energia da onda por unidade de área;

ρ = massa específica da água;

g = aceleração da gravidade.

Com a finalidade de se obter um parâmetro, proveniente do espectro, mais semelhante possível com a altura de onda significativa, H_S , para efeito de comparação, foi necessário multiplicar a equação acima por $\sqrt{2}$. A altura de onda pode ser calculada a partir da área, m_0 , medida abaixo da curva espectral, como (BOUWS et al., 1998):

$$H_{m0} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{8E}{\rho g}} = 4\sqrt{m_0} \quad (\text{equação 24})$$

O parâmetro m_0 , que refere-se à variância total do registro da superfície de água, é tratado como sendo a energia total, quando na realidade E é igual à multiplicação dos fatores ρ , g e m_0 . Na teoria a relação entre H_{m0} e H_S é válida apenas para um espectro bastante estreito, algo que não ocorre com frequência na natureza. Apesar disso, a diferença é relativamente pequena na maioria dos casos, em média $H_{m0} = 1,05 H_S$ (BOUWS et al., 1998).

A dedução para o período de onda proveniente do espectro é um processo mais complicado, devido à grande variedade de formas espectrais. Os parâmetros espectrais empregados, relativos à frequência e ao período, são:

- a) f_p – frequência de onda correspondente ao pico do espectro;
- b) T_p – período de onda correspondente a f_p , ou seja, $T_p = 1/f_p$;
- c) T_{m01} - período de onda correspondente à frequência média do espectro (BOUWS et al. 1998).

Conforme Goda¹⁴ (1978 apud BOUWS, 1998), o período de ondas significativo, $T_{1/3}$, mantém-se dentro de uma gama de valores que vai desde $0,87 \cdot T_p$ a $0,97 \cdot T_p$.

De acordo com Bendat e Piersol (2000), é comum na prática introduzir uma janela temporal para eliminar as discontinuidades no início e no fim dos registros a serem analisados. Existem diversas janelas deste tipo, mas uma das primeiras e ainda normalmente empregada é uma janela cossenoidal chamada janela Hanning.

¹⁴ GODA, Y. The observed joint distribution of periods and heights of sea waves. In: COASTAL ENGINEERING CONFERENCE, 16., 1978, Hamburgo, Alemanha. *Proceedings...* Alemanha, 1978. p. 227-246

4 METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados o modelo físico bidimensional do vertedouro em degraus, os equipamentos de medição utilizados nos experimentos, as características dos ensaios realizados e os métodos de análise dos dados obtidos.

4.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a caracterização das ondas geradas a jusante de dissipador por ressalto hidráulico, foram utilizados os resultados obtidos de ensaios realizados no canal de seção retangular existente no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), localizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS. Dentro deste canal há um vertedouro em degraus, de 2,45 metros de altura, inclinado em 53° com a horizontal e que possui um perfil tipo *Creager*. O trecho horizontal a jusante do vertedouro (bacia de dissipação) tem 8 metros de comprimento e 40 centímetros de largura.

A estrutura do modelo é composta de perfis metálicos, com janelas laterais de acrílico no trecho que inclui o vertedouro e os primeiros cinco metros da bacia de dissipação. A figura 11 ilustra o modelo reduzido.

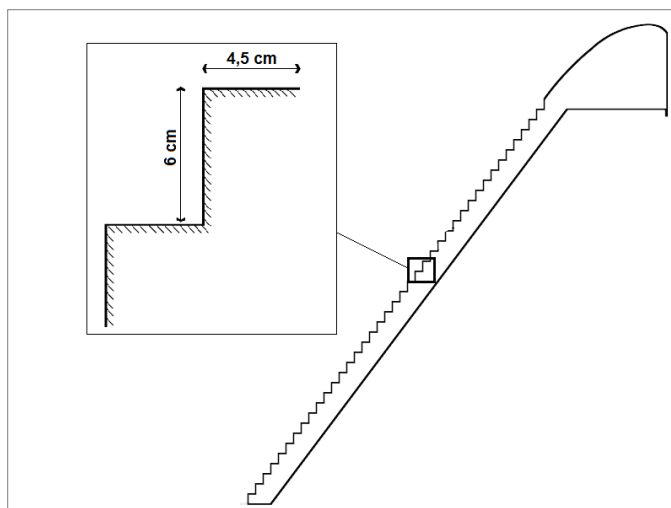
Figuras 11 – Modelo reduzido utilizado



(fonte: elaborado pelo autor)

A figura 12 apresenta um esquema da calha do vertedouro, composta por 33 degraus de 6 cm de espelho e 4 cm de base.

Figura 12 – Detalhe do vertedouro em degraus



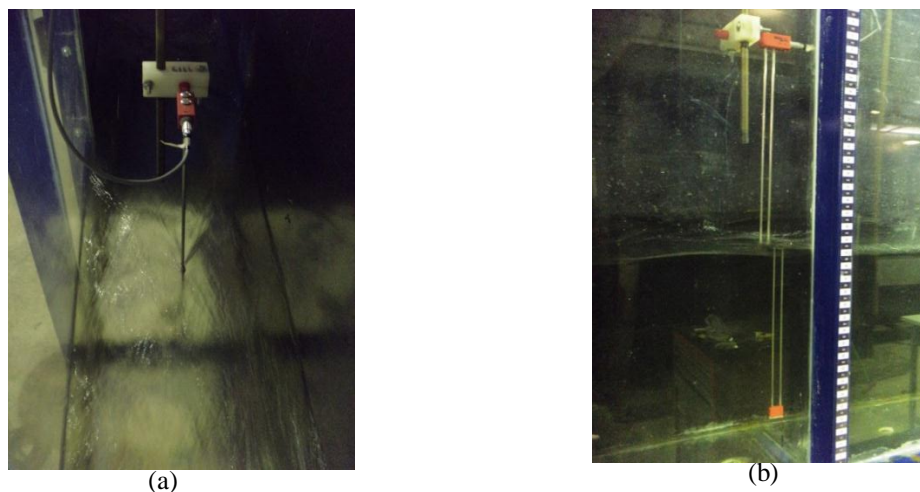
(fonte: CONTERATO, 2014)

O modelo é abastecido por uma tubulação de ferro fundido de 300 mm de diâmetro, conectada a uma moto-bomba centrífuga de 50 CV de potência, operada por um inversor de frequência para ajuste das vazões simuladas. Um reservatório subterrâneo de 600 m³ abastece o sistema. Na bacia a jusante há uma comporta para regulagem de nível. Após esta há um canal de retorno, que conduz a água de volta ao reservatório.

O vertedouro está numa escala de redução geométrica de 1:10. As equações utilizadas para transferir grandezas de protótipo para modelo seguiram o critério de Froude, que relaciona a força inercial com a gravitacional.

Na bacia de dissipação foi instalada uma sonda posicionada perpendicularmente à direção do escoamento, conforme ilustrado na figura 13, para medição da variação vertical da superfície livre da água. Essa sonda é do tipo capacitiva, constituída por duas hastes paralelas de aço inoxidável. A sonda e o sistema de condicionamento de sinais utilizados para a medição das ondas são fabricados pelo DHI (*Danish Hydraulic Institute*). O amplificador foi conectado a uma placa de aquisição de dados da marca *National Instruments*, modelo USB 6008.

Figura 13 – Detalhe da sonda utilizada:
(a) vista superior; (b) vista lateral



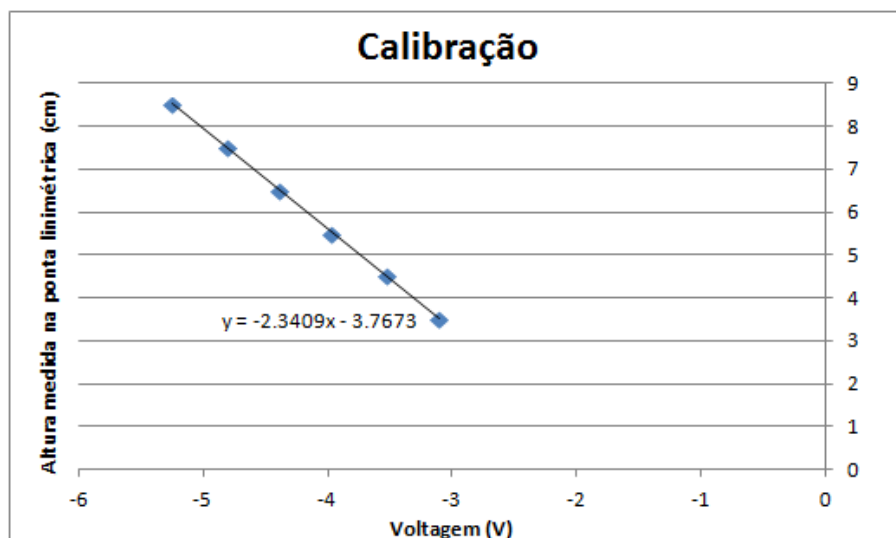
(fonte: elaborado pelo autor)

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A primeira etapa do experimento em laboratório foi a calibração da sonda. Este processo é necessário para obter a relação entre os valores indicados pelo equipamento e os valores correspondentes aos padrões utilizados. O canal foi preenchido com água até o nível aproximado de 317 mm, verificado por um piezômetro posicionado a jusante da bacia. A sonda foi então colocada dentro do canal, sendo fixada por um suporte de metal juntamente com uma ponta linimétrica, para ajuste da posição vertical. Através de um programa desenvolvido utilizando o *software Labview*, registraram-se os valores em voltagem correspondentes a cinco profundidades diferentes. A taxa de aquisição determinada para todo o procedimento foi de 200 Hz. Cada registro iniciava após o repouso completo da superfície livre da água, verificado visualmente.

A resposta das sondas é linear, sendo possível estabelecer a relação entre tensão e altura a partir da equação de uma reta. A figura 14 apresenta o resultado de uma das calibrações feitas. Utilizando o *software Microsoft Excel*, obtém-se a equação correspondente à reta ajustada, a qual foi necessária posteriormente na conversão dos dados adquiridos nos ensaios. O objetivo foi analisar a relação numérica entre a variação de voltagem e a correspondente alteração na altura da água.

Figura 14 – Exemplo de registro da calibração



(fonte: elaborado pelo autor)

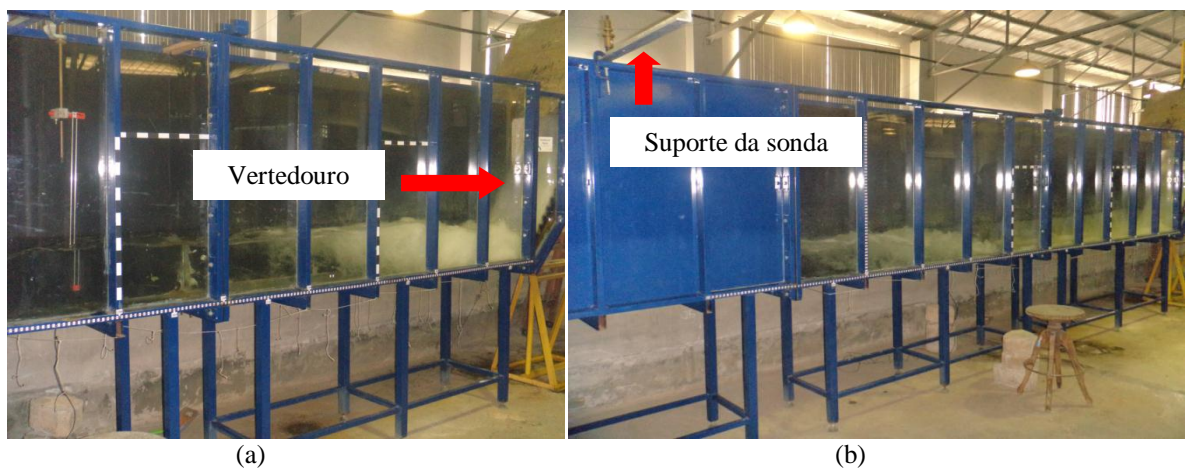
Após o processo de calibração das sondas, eliminou-se a água presente dentro da bacia a jusante. Iniciou-se então o escoamento ao longo do modelo. O controle da vazão é possível devido ao medidor eletromagnético incorporado no sistema de alimentação. A profundidade de água a jusante do vertedouro é regulada por uma comporta. Quando o nível e a vazão desejados eram atingidos (verificados no piezômetro e no medidor eletromagnético, respectivamente), esperava-se o escoamento entrar em um regime estacionário, para então começar a aquisição de dados a partir da sonda. Cada registro consistiu em três testes de 5 minutos. Este tempo de duração selecionado foi estudado previamente, onde verificou-se que era suficiente para abranger a variabilidade do comportamento da superfície da água durante o escoamento.

As vazões simuladas no experimento foram as de 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 e 80l/s. Escolheram-se as vazões mínima e máxima de 40 e 80l/s, respectivamente, de acordo com as limitações do modelo físico. O objetivo foi ensaiar cada vazão sob quatro condições diferentes. Primeiro, a comporta do final da bacia a jusante foi ajustada de forma a posicionar o início do ressalto hidráulico junto ao impacto do jato, oriundo do vertedouro. Nestas condições, considerou-se que o ressalto é livre. Depois, a comporta foi fechada, de forma a obter uma altura de jusante 10% superior, obtendo um ressalto afogado. Após este registro, a comporta foi fechada mais um pouco, de modo que o nível de jusante fosse 20% superior à altura para ressalto livre. O último registro para a respectiva vazão era realizado após a abertura da comporta até o ressalto posicionar-se o mais a jusante possível, antes que a sonda

sofresse o efeito de reflexão da própria comporta, alterando as ondas originadas pelo ressalto. Essa alteração na posição do ressalto é mostrada na figura 15.

A sonda capacitiva foi colocada a jusante do ressalto, o mais próxima possível deste. Sua exata posição foi definida visualmente, de modo que as hastes da sonda não sofressem o impacto do regime de bolhas oriundo do ressalto hidráulico. Essas bolhas, ao colidir com as hastes da sonda, poderiam alterar a forma da onda medida. Houve cuidado ao instalar este equipamento para mantê-lo o mais vertical e nivelado possível, e preso de forma a evitar uma trepidação excessiva que pudesse interferir na medição. Por isso, a sonda foi mantida sempre mergulhada o máximo possível dentro do escoamento, de acordo também com o valor numérico do sinal que era captado pelo *software* utilizado, que era limitado de -10 V a 10 V. Na figura 15, são mostradas duas condições de ensaio para a vazão de 40 l/s, ambas com ressalto livre, onde a variação de nível de jusante alterou a posição do ressalto. Como que houve esta modificação, a sonda também teve a sua posição alterada. Na figura 15b, não se pode visualizar a posição da sonda, apenas o seu suporte, já que ela teve que ser colocada no trecho do canal onde há paredes metálicas. Quando o ressalto foi submerso, a posição da sonda foi equivalente à definida no caso de ressalto livre no pé do vertedouro.

Figura 15 – Ensaio com a vazão de 40 l/s – (a) ressalto no pé do vertedouro
(b) ressalto afastado do vertedouro



(fonte: elaborado pelo autor)

Cada ensaio consistiu de três registros de 5 minutos. Cada registro era uma série de 60000 (sessenta mil) valores de voltagem em função do tempo, em segundos. Como a frequência de aquisição foi de 200Hz, o período das amostras foi de 0,005 segundos. Todos os registros foram gravados em arquivos txt (arquivos em formatos de texto) para serem processados em

dois *softwares*: o SAM - Módulo 6 (desenvolvido no LNEC), para cálculo da altura significativa, e o Matlab, onde foi realizada a análise espectral, a fim de obter o período dominante.

O SAM - Módulo 6 é um *software* que permite realizar a análise temporal de amostras. Ao se inserir o arquivo txt, devem-se ajustar dois parâmetros: o período da amostra (obtido a partir da frequência de aquisição dos dados) e uma constante K, utilizada para ajuste de ganho do sinal (neste caso sempre igual a 1). Por último, escolhe-se o critério de cruzamento por zero, que neste trabalho foi o zero ascendente 4.

Segue, na tabela 1, a relação dos experimentos, mostrando a vazão em litros por segundo, o nível de submergência em milímetros e a posição da sonda, em metros. O nível e a posição 'a' referem-se ao ressalto livre iniciado no pé do vertedouro; os índices 'b' e 'c', ao ressalto com nível de submergência de 10 e 20%, respectivamente, enquanto a letra 'd' indica o ressalto livre afastado do pé do vertedouro. Neste último caso, foi definida sempre a posição 5,9 m (medido a partir do pé do vertedouro) para a sonda, considerado o valor limite antes do efeito de reflexão. Este efeito pode alterar os valores de altura e período obtidos devido apenas ao fenômeno do ressalto, que é o foco deste trabalho.

Tabela 1 – Posição da sonda para cada ensaio

Vazão (l/s)	Nível a (mm)	Posição a (m)	Nível b (mm)	Posição b (m)	Nível c (mm)	Posição c (m)	Nível d (mm)	Posição d (m)
40	265	3,05	289	3,05	317	3,05	217	5,90
45	289	3,41	318	3,44	347	3,48	242	5,90
50	301	3,51	331	3,67	361	3,75	262	5,90
55	320	3,88	352	3,90	384	4,02	282	5,90
60	339	4,17	375	4,17	408	4,17	300	5,90
65	354	4,3	389	4,3	425	4,41	320	5,90
70	372	4,45	409	4,45	446	4,52	337	5,90
75	389	4,59	428	4,62	467	4,63	356	5,90
80	409	4,76	449	4,76	490	4,76	371	5,90

(fonte: elaborado pelo autor)

Para verificar a influência da profundidade a jusante na formação do fenômeno ondulatório, alguns valores de nível obtidos para determinadas vazões foram repetidos nos ensaios com vazões de valores próximos. Como foram ensaiados os níveis 265 mm para a vazão 40 l/s e

262 mm para a vazão 50 l/s, um valor próximo a 262 e 265 foi repetido para a vazão de 45 l/s. Mas esse valor de profundidade a jusante não foi possível de ser reproduzido no modelo para vazões maiores ou iguais a 55 l/s, já que a sonda teria que ser posicionada mais a jusante do que a posição 5,9 m. Situação semelhante ocorreu para as vazões superiores. No final, os níveis em comum ensaiados foram o de 265 para as vazões 40, 45 e 50, o nível 320 para 55, 60 e 65 l/s, e a profundidade 372 para 70, 75 e 80 l/s.

A tabela 2 mostra a relação dos números de Froude Fr_1 , calculados em função da vazão e da profundidade h_1 , esta obtida pela equação de Bélanger (equação 1), já que apenas a lâmina a jusante do ressalto era conhecida com precisão. De acordo com a classificação de Peterka (1984), o estudo abrangeu o ressalto do tipo estável ($4,5 < Fr_1 < 9$).

Tabela 2 – Relação de todos os ensaios realizados

Vazão (l/s)	Nível de Submersão (mm)	Número de Froude a Montante (Fr_1)	Vazão (l/s)	Nível de Submersão (mm)	Número de Froude a Montante (Fr_1)
40	265 (S=1)	7,44	60	300 (S=1)	5,29
40	289 (S=1,1)	7,44	60	320 (S=1)	6,02
40	317 (S=1,2)	7,44	65	354 (S=1)	6,81
40	217 (S=1)	4,49	65	389 (S=1,1)	6,81
45	289 (S=1)	7,6	65	425 (S=1,2)	6,81
45	318 (S=1,1)	7,6	65	320 (S=1)	5,34
45	347 (S=1,2)	7,6	70	372 (S=1)	6,81
45	242 (S=1)	4,83	70	409 (S=1,1)	6,81
45	265 (S=1)	6,07	70	446 (S=1,2)	6,81
50	301 (S=1)	7,10	70	337 (S=1)	5,29
50	331 (S=1,1)	7,10	75	389 (S=1)	6,79
50	361 (S=1,2)	7,10	75	428 (S=1,1)	6,79
50	262 (S=1)	4,94	75	467 (S=1,2)	6,79
55	320 (S=1)	6,98	75	356 (S=1)	5,49
55	352 (S=1,1)	6,98	75	372 (S=1)	6,05
55	384 (S=1,2)	6,98	80	409 (S=1)	6,91
55	282 (S=1)	5,11	80	449 (S=1,1)	6,91
60	339 (S=1)	6,99	80	490 (S=1,2)	6,91
60	375 (S=1,1)	6,99	80	371 (S=1)	5,46
60	408 (S=1,2)	6,99	-	-	-

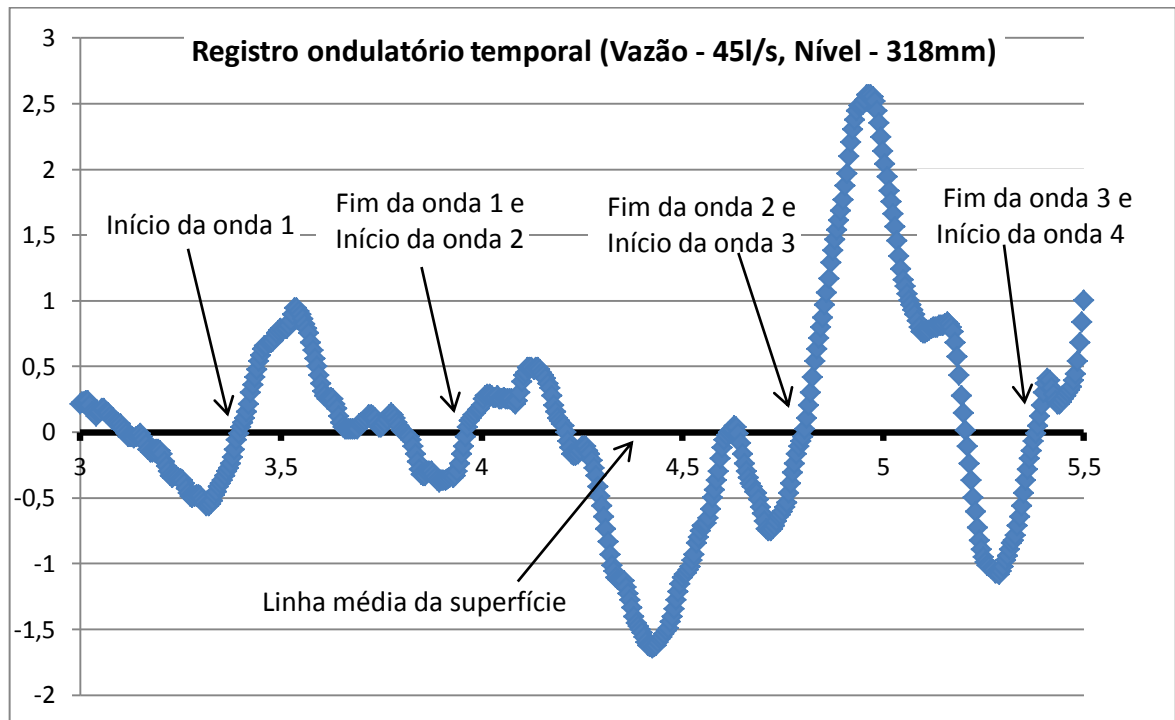
(fonte: elaborado pelo autor)

4.3 MÉTODOS DE ANÁLISE

A avaliação da altura representativa do fenômeno ondulatório se deu através do uso do SAM - Módulo 6, onde pode-se extrair os dados de altura significativa (H_s), altura média ($H_{\text{médio}}$), altura máxima ($H_{\text{máx}}$), período significativo (T_s), período médio ($T_{\text{médio}}$) e período máximo ($T_{\text{máx}}$). Seguindo as recomendações da bibliografia, foi adotado o valor de altura significativa como representativo da amostra. O período significativo não foi considerado por não ter sido encontrado em referências anteriores, e também porque ao proceder com a análise espectral, notou-se sempre um período de pico bem destacado em cada registro. Portanto, este último método pareceu ser o mais adequado para analisar esse parâmetro.

A técnica escolhida para a identificação das ondas foi a ascendente com 4 pontos. Ela consiste em subtrair de todos os valores do registro o nível médio da superfície livre, sendo baseada no método do zero-ascendente, no qual as ondas de um registro são definidas pelo ponto de cruzamento ascendente na linha média. O ascendente com 4 pontos foi selecionado para o estudo porque considera necessário ocorrer, ao menos, 2 valores abaixo e 2 valores acima da linha média para caracterizar o início e o fim de cada onda. Desta forma, foram excluídas da análise oscilações insignificantes da superfície em torno da linha média, já que o objetivo do estudo é identificar a onda característica em um ambiente fluvial. A figura 16 ilustra como são definidas as ondas.

Figura 16 – Exemplo de aplicação do método ascendente 4 pontos



(fonte: elaborado pelo autor)

Para o cálculo do período de pico na estimativa da função de densidade espectral, foi utilizado o método da transformada rápida de Fourier desenvolvido por Welch, conforme implementado no aplicativo utilizado. Através dessa técnica matemática, pôde-se gerar uma série de dados no domínio da frequência, a partir de outra que estava no domínio temporal. O método de Welch difere da transformada original proposta por Fourier pela divisão da série original em determinado número de segmentos. Para cada um destes, calculou-se um periodograma (gráfico da amplitude em função da frequência). O periodograma resultante foi definido a partir da média de todos os calculados para os trechos, para o que é utilizado um processo de “alisamento” com emprego da janela espectral. Dessa forma, resultou uma curva mais “suave” do que o periodograma obtido pelo método original de Fourier, apresentando portanto menor variância no eixo das ordenadas. Assim, foi possível identificar a frequência de maior energia do fenômeno, a partir da qual se obteve o período de pico. Não foram encontradas referências sobre quais características utilizar para a janela espectral neste tipo de fenômeno. Após alguns testes, decidiu-se adotar a janela de Hanning com largura de 1/16 do tamanho da amostra.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os ensaios no modelo físico do vertedouro em degraus tiveram como objetivo identificar as características das ondas atuantes à jusante de dissipador por ressalto hidráulico. Variando a vazão de escoamento no modelo e o nível de submergência do canal a jusante, foram realizados 39 registros diferentes, com o objetivo de analisar a relação entre as características das ondas e os parâmetros hidráulicos resultantes da análise dimensional. Para calcular a altura de onda, foi realizada análise temporal (domínio do tempo), enquanto que para identificar o período dominante, utilizou-se a análise espectral (domínio da frequência).

Na tabela 3, estão apresentados os resultados obtidos para ressalto livre.

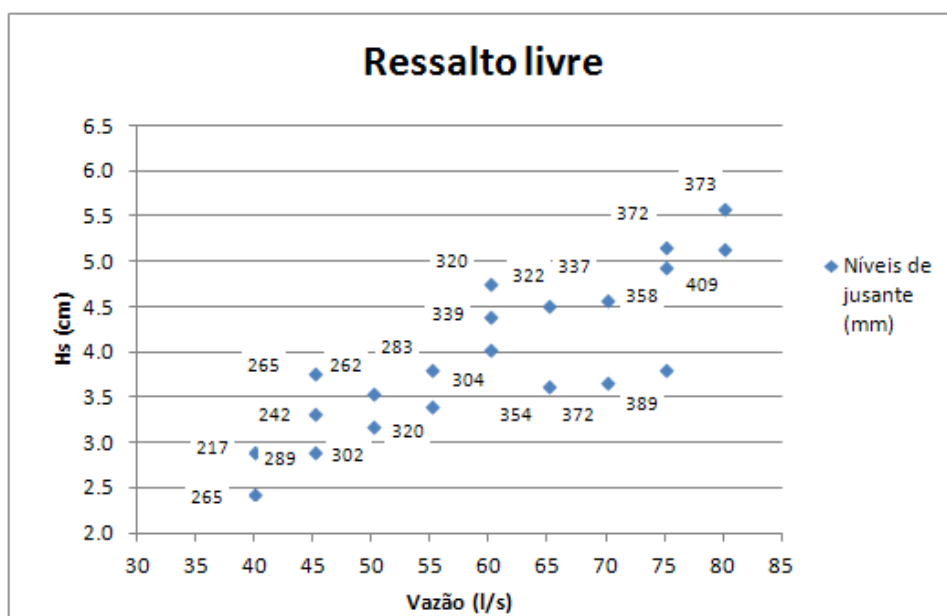
Tabela 3 – Altura significativa e período de pico nos casos de ressalto livre

Vazão (l/s)	Nível (mm)	Hs (cm)	Tp (s)
40	217	2,89	1,44
40	265	2,42	1,25
45	242	3,31	1,41
45	265	3,75	1,35
45	289	2,89	1,31
50	262	3,54	1,44
50	302	3,17	1,34
55	283	3,80	1,48
55	320	3,40	1,44
60	304	4,02	1,48
60	320	4,75	1,34
60	339	4,40	1,44
65	322	4,50	1,56
65	354	3,61	1,56
70	337	4,57	1,83
70	372	3,66	1,56
75	358	4,94	1,82
75	372	5,15	1,66
75	389	3,80	1,76
80	373	5,57	1,76
80	409	5,12	1,66

(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando a tabela 3 nota-se que, para uma determinada vazão, as alturas significativas tendem a diminuir com o aumento do nível de submergência. Isso está de acordo com os resultados obtidos por Lopardo (1978), e segue a lógica de que o aumento de nível deve contribuir com uma maior dissipação de energia no ressalto. Outra conclusão é a de que o aumento da vazão produz um aumento da altura significativa, provavelmente devido à maior energia fornecida ao ressalto. No gráfico abaixo (figura 17), é representado o parâmetro H_s em relação à vazão Q , cada uma com dois ou três níveis de jusante associados. Lembrando que são mostrados apenas os casos de ressalto livre.

Figura 17 – Altura significativa em relação a vazão de escoamento

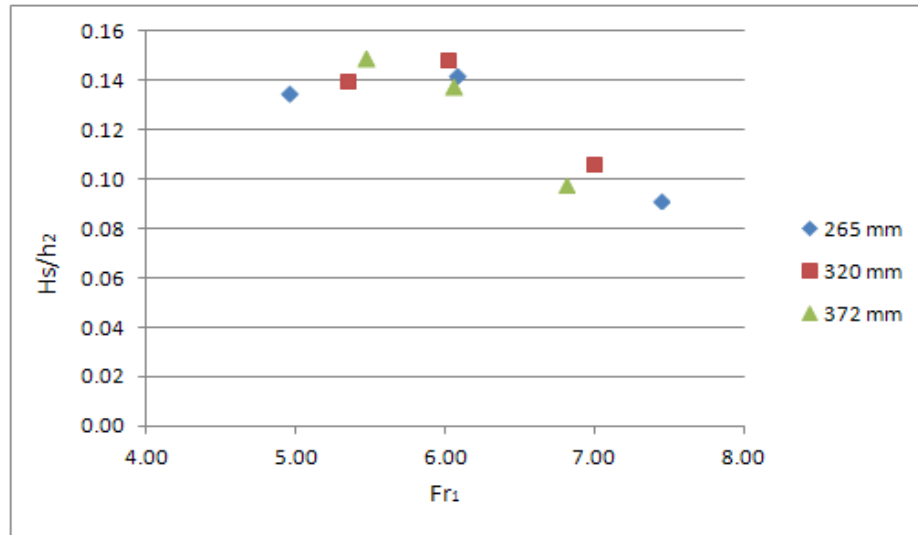


(fonte: elaborado pelo autor)

Para verificar a influência do nível de jusante apenas considerando o ressalto livre, a comporta a jusante do canal foi fixada em três posições diferentes, para cada qual foi possível aplicar no modelo três vazões de escoamento distintas. Na posição que mantinha o nível de jusante próximo a 265 mm, foram simuladas as vazões 40, 45 e 50 l/s, na submergência de 320 mm, realizaram-se ensaios com 55, 60 e 65 l/s, enquanto que para o nível 372 mm, foi possível escoar 70, 75 e 80 l/s. No gráfico a seguir (figura 18), relacionaram-se os adimensionais H_s/h_2 (altura significativa sobre altura conjugada lenta) e Fr_1 (número de Froude incidente), para os três níveis ensaiados. Nota-se que o aumento do número de Froude tende a diminuir a razão H_s/h_2 . Enquanto que para valores de Fr_1 da faixa de 4,94 a 6,05 a altura significativa correspondente oscila entre 13 e 15% da altura conjugada lenta do ressalto, para Fr_1 variando

de 6,81 a 7,44 a porcentagem de H_s em razão de h_2 oscilou entre 9 e 11%. A quantidade de dados disponíveis não demonstrou ser suficiente para propor uma equação de ajuste relacionando estes parâmetros.

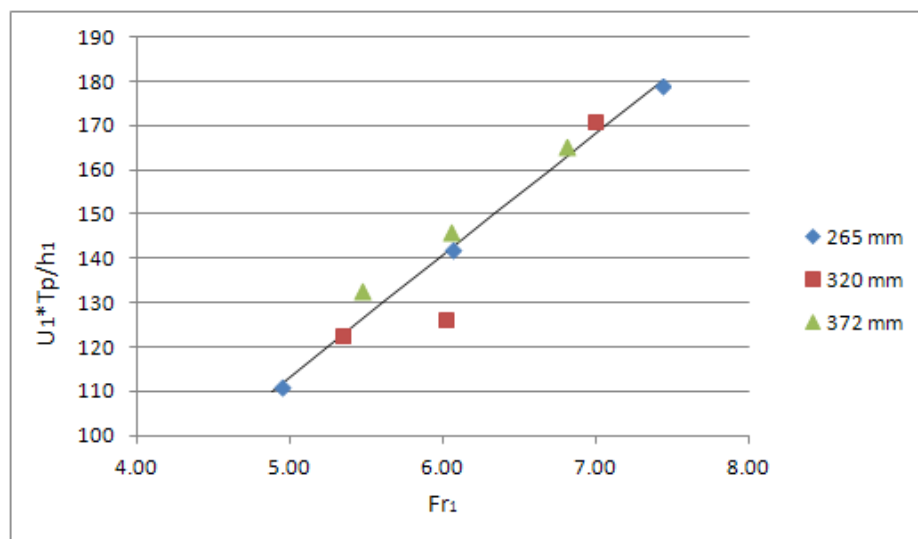
Figura 18 – H_s/h_2 em relação a Fr_1 (ressalto livre)



(fonte: elaborado pelo autor)

A fim de analisar a influência da variação única de Fr_1 sobre o período de pico, utilizou-se o mesmo parâmetro adimensional proposto por Lopardo (1978) para o resalto livre, que corresponde ao número de Strouhal invertido. Ao analisar a figura 19, verifica-se uma relação praticamente linear, com uma tendência de crescimento similar à obtida por Lopardo (1978).

Figura 19 – $U_1 \cdot T_p/h_1$ em relação a Fr_1 (profundidade constante)



(fonte: elaborado pelo autor)

Como não foram encontrados na bibliografia estudos sobre o fenômeno ondulatório formado a jusante de ressalto hidráulico após um vertedouro, semelhante ao aqui efetuado, buscou-se comparar os resultados obtidos com os trabalhos realizados por Lopardo (1978) e Abou-Seida (1963). Estes autores avaliaram as ondas formadas por um ressalto a jusante de comporta, o que reduz a possibilidade de comparação direta com os resultados deste trabalho, mas, ainda sim, permitindo chegar a algumas conclusões importantes. Abou-Seida também estudou o fenômeno ondulatório a jusante de um dissipador tipo concha, porém como neste caso o escoamento não tem a mesma conformação do ressalto hidráulico, a comparação possui restrições, já que os parâmetros de influência no surgimento das ondas não são exatamente os mesmos.

Lopardo (1978) analisou em seu trabalho o fenômeno ondulatório provocado por um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta em um canal horizontal. Numa tentativa de encontrar uma relação da altura significativa em função do número de Froude incidente, ele chegou à expressão 25, mostrada a seguir. Com a utilização do parâmetro h_1 (altura conjugada rápida) no lado esquerdo da equação, o autor obteve um adimensional para comparação. Essa relação foi válida para Fr_1 variando de 1 a 6, no caso de ressalto livre.

$$H_s/h_1 = 1/6 * (Fr_1-1) \quad (\text{equação 25})$$

No gráfico da figura 20, foram representados os resultados obtidos no estudo para ressalto livre, a fim de comparar com a pesquisa feita por Lopardo (1978). Nota-se que os valores de altura obtidos pelo autor citado foram inferiores aos calculados neste trabalho, possivelmente pelas diferenças no tipo de ressalto utilizado e nas escalas de redução geométrica de cada modelo. Enquanto Lopardo (1978) realizou o seu trabalho estudando um ressalto formado pelo uso de comporta posicionada contra o escoamento, o ressalto nesta pesquisa foi formado a jusante de um vertedouro em degraus, com uma taxa de dissipação de energia diferente devido ao impacto do jato no canal a jusante.

Outros fatores que podem ser responsáveis pelas diferenças encontradas nos resultados foram a posição da medição e o controle do parâmetro h_1 . Lopardo (1978) posicionou o seu equipamento de medição de níveis de superfície mais a jusante do ressalto (aproximadamente duas vezes o seu comprimento), enquanto que nesta pesquisa posicionou-se a sonda mais a

montante (logo após o término das bolhas). A altura conjugada rápida foi mantida constante por aquele autor, fixada por outra comporta, enquanto que no caso desta pesquisa h_1 variou com a vazão de escoamento.

Na tentativa de ajustar uma equação similar à de Lopardo (1978), chegou-se à expressão 26, cujos resultados também estão representados graficamente. O coeficiente de reta obtido foi igual a $1/4,5$.

$$H_s/h_1 = 1/4,5 * (Fr_1 - 1) \quad (\text{equação 26})$$

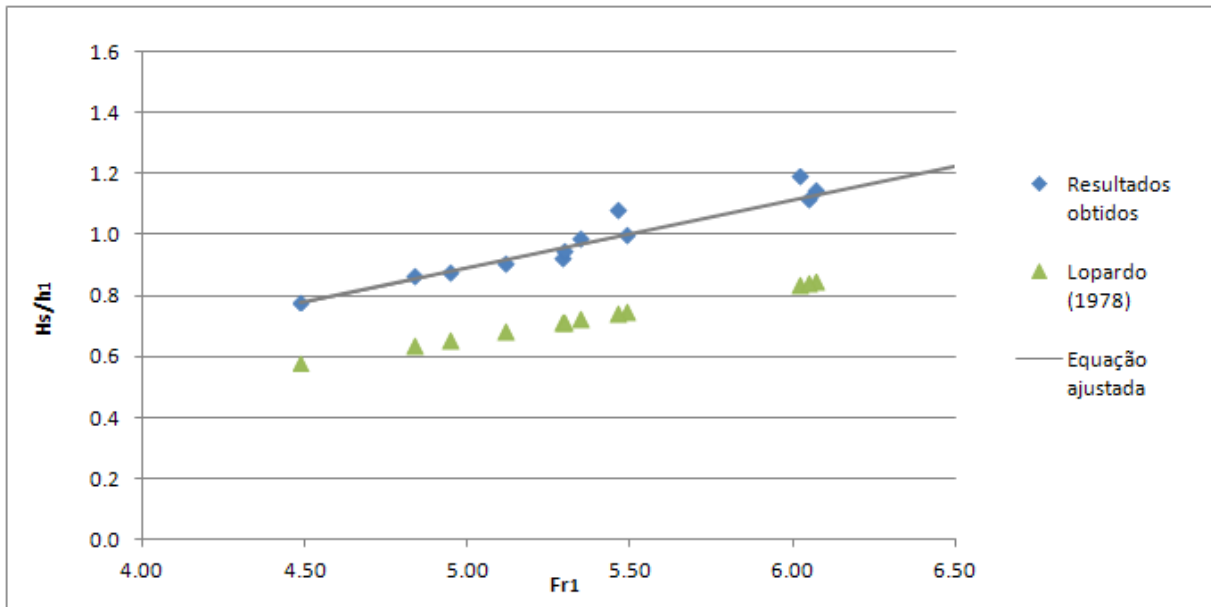
Onde:

H_s = altura significativa;

h_1 = altura conjugada rápida;

Fr_1 = número de Froude incidente.

Figura 20 – H_s/h_1 em relação a Fr_1 (ressalto livre)



(fonte: elaborado pelo autor)

Na pesquisa realizada por Lopardo (1978), também foi realizada a análise espectral para o cálculo do período de pico. No caso do resalto livre, foi possível comparar os resultados desse autor com os deste trabalho para o número de Froude incidente menor do que 7,5 (figura 21). Esse autor apontou uma tendência de crescimento do adimensional $U_1 * T_p / h_1$ com

o aumento de Fr_1 (equação 27). Nesta pesquisa estes dois parâmetros apresentaram uma taxa de crescimento similar (equação 28), mas com valores bem superiores. Uma justificativa para este fato pode ser a diferença entre o tipo de ressalto utilizado nas duas pesquisas, como já citado para o cálculo da altura significativa.

$$U_1 * T_p / h_1 = 6 * (Fr_1 - 1)^{1,42} \quad (\text{equação 27})$$

$$U_1 * T_p / h_1 = 37 * (Fr_1 - 1,29)^{0,88} \quad (\text{equação 28})$$

Onde:

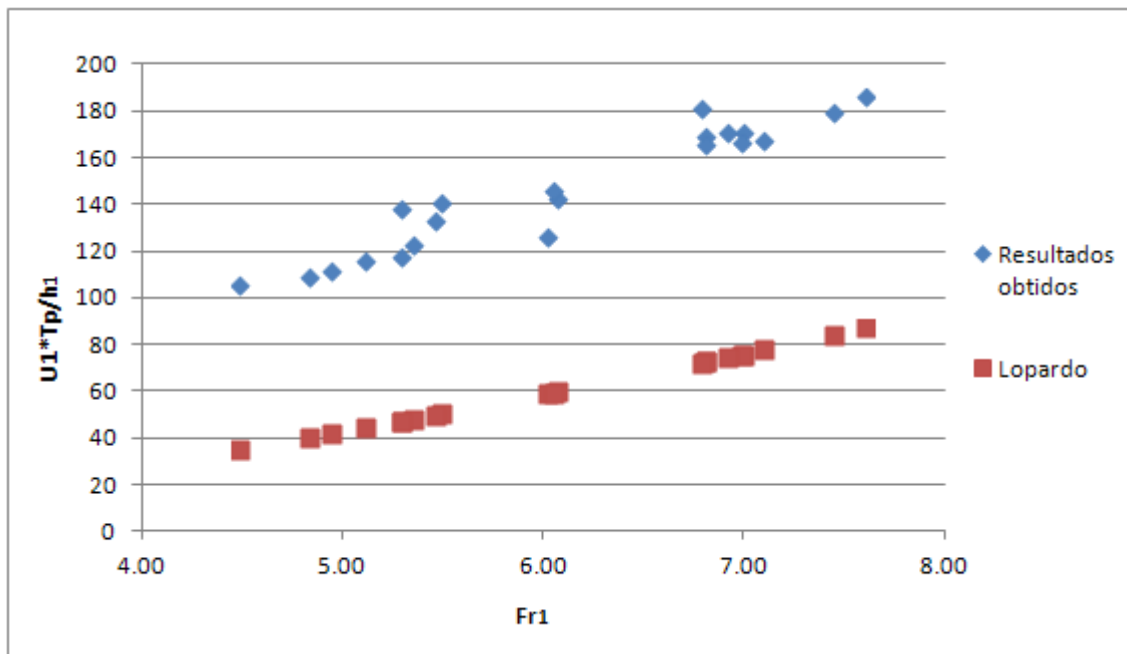
U_1 = velocidade incidente no ressalto;

h_1 = altura conjugada rápida;

T_p = período de pico;

Fr_1 = número de Froude incidente.

Figura 21 – $U_1 * T_p / h_1$ em relação a Fr_1 (ressalto livre)

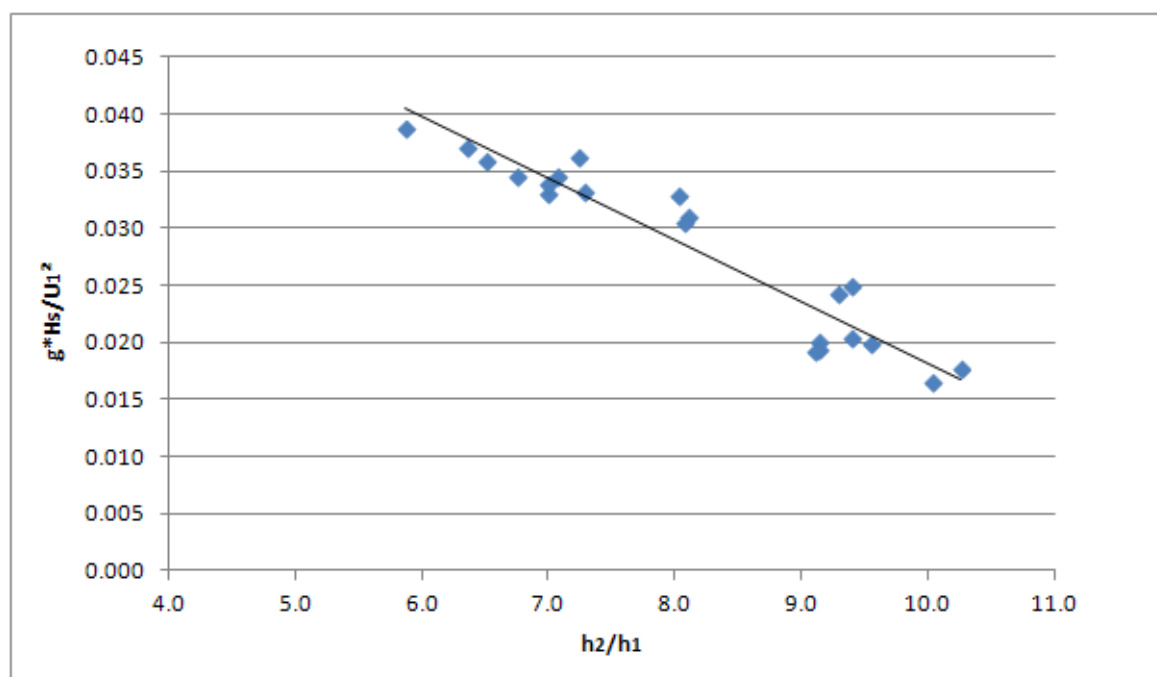


(fonte: elaborado pelo autor)

Abou-Seida (1963) analisou em seu trabalho as ondas geradas a jusante de ressalto hidráulico e de um dissipador tipo concha. O ressalto hidráulico também foi formado a jusante de comporta, como na pesquisa de Lopardo (1978). Ele, ainda, utilizou diferentes inclinações na calha a jusante do ressalto.

Ao analisar a relação da altura significativa com a altura conjugada lenta, Abou-Seida (1963) propôs o uso dos parâmetros g^*H_s/T^2 e h_2/h_1 . Com os seus resultados, ele concluiu que o aumento do nível da bacia promoveu um acréscimo na altura da onda. Porém, nesta pesquisa a situação foi inversa: quanto maior a razão entre as alturas conjugadas do ressalto, menor foi o valor de H_s . Isto está de acordo com os resultados de Lopardo (1978), e segue a lógica de que o aumento do nível d'água deve provocar maior dissipação da carga hidráulica através do ressalto, diminuindo a energia de propagação da onda pelo curso d'água. Na figura 22 estão os resultados obtidos no presente trabalho.

Figura 22 – g^*H_s/U_1 em relação a h_2/h_1 (ressalto livre)



(fonte: elaborado pelo autor)

Observando a tendência de comportamento da relação acima, pôde-se propor a seguinte equação:

$$g \cdot H_s / U_1^2 = -0,0054 \cdot h_2 / h_1 + 0,0721 \quad (\text{equação 29})$$

Onde:

g = aceleração da gravidade;

H_s = altura significativa da onda;

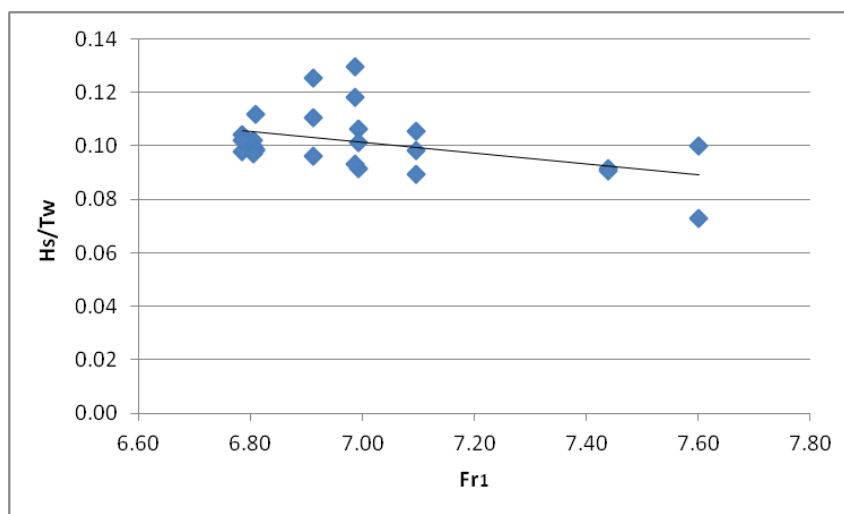
U_1 = velocidade incidente no ressalto;

h_2 = altura conjugada lenta;

h_1 = altura conjugada rápida.

Quando o nível d'água de uma bacia de dissipação supera a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico, este passa a ser chamado de ressalto afogado. Nesta pesquisa, buscou-se melhor compreender o quanto esse aumento da profundidade a jusante, que altera a característica do ressalto, interfere na altura da onda. Para isso, foram testados dois níveis de submergência para cada vazão de escoamento, através do acréscimo de 10 e 20% sobre a altura d'água medida quando o ressalto encontra-se posicionado no pé do vertedouro. Seguem no gráfico da figura 23 os resultados obtidos. Denominou-se a profundidade de água após o ressalto como T_w , que varia se o ressalto é livre ou submerso. Observa-se que a faixa do número de Froude avaliada é bastante reduzida. Isto deve-se à calha feita em degraus, que é responsável por reduzir significativamente o número de Froude na entrada do ressalto se comparada com a calha lisa, conforme Conterato (2014).

Figura 23 – H_s/T_w em relação a Fr_1



(fonte: elaborado pelo autor)

Analisando o gráfico da figura 23, nota-se primeiramente uma tendência de decréscimo linear da razão H_s/T_w em relação a Fr_1 , apesar da variabilidade encontrada. Aqui, o aspecto relevante a destacar é que a altura significativa da onda oscilou na faixa dos 10% da profundidade de água a jusante do ressalto, atingindo no máximo 13% de T_w .

6 CONCLUSÕES

Após a análise dos dados realizada neste trabalho e as comparações com os resultados de outros autores, foi possível chegar a algumas conclusões sobre as características das ondas geradas a jusante de dissipador por ressalto hidráulico.

De acordo com os valores obtidos no caso de ressalto livre, verificou-se que a altura significativa da onda aumenta linearmente em relação ao número de Froude de incidência no ressalto. Isto ficou de acordo com as conclusões de Lopardo (1978), sendo possível ajustar, neste trabalho, uma equação bastante próxima à obtida por ele. A pequena diferença entre valores de H_s/h_1 , mostrada na figura 20, deve ocorrer devido ao tipo de geração de ressalto hidráulico feita nos dois trabalhos. Enquanto que na pesquisa de Lopardo o ressalto surgiu a jusante de uma comporta, neste estudo o ressalto hidráulico ocorre a jusante de um vertedouro em degraus, onde há uma dissipação da energia do escoamento tanto no impacto do jato, quando ao longo da calha do vertedouro.

Ao analisar o período de pico, verificou-se uma tendência de crescimento do parâmetro $U_1 T_p/h_1$ em relação ao número de Froude de incidência no ressalto similar à obtida por Lopardo (1978). Foi possível novamente ajustar uma equação, desta vez em formato exponencial, para cálculo do período de pico no caso de ressalto livre.

Ao alterar a posição do ressalto hidráulico em relação ao pé do vertedouro, pôde-se verificar a influência do nível de jusante (para o caso de ressalto livre, correspondente à altura conjugada lenta) na variação da altura e do período da onda. Analisando a figura 18, pôde-se concluir que, dentro da faixa do número de Froude estudada, a altura significativa atingiu o máximo de 15% da altura conjugada lenta. Este valor do parâmetro H_s/h_2 dificilmente deve ser ultrapassado, visto que há uma tendência de decréscimo desse adimensional em relação a Fr_1 que deve se manter para valores da faixa do número de Froude superior à analisada.

Quando o nível a jusante do ressalto foi elevado até superar a altura conjugada lenta, considerou-se esse ressalto como afogado. Na tentativa de verificar o quanto este aumento de nível influencia na altura significativa da onda, chegou-se na relação expressa na figura 23. Para valores de Fr_1 entre 6,60 e 7,20, a relação H_s/T_w ficou entre 9 e 13%, enquanto que para

valores superiores do número de Froude, essa porcentagem decaiu. A dissipação de energia na calha do vertedouro impossibilitou a investigação de uma faixa maior de valores de Fr_1 .

Recomenda-se que sejam continuados os estudos sobre as ondas geradas a jusante de obras hidráulicas. Além da necessidade de avaliar outras faixas do número de Froude (este trabalho foi focado apenas na faixa que caracteriza o ressalto estável), devem-se analisar as características de ondas formadas a jusante de outros dissipadores de energia hidráulica, a fim de abranger todas as condições existentes na prática.

REFERÊNCIAS

- ABOU-SEIDA, M. M. Wave action below spillways. **Journal of Hydraulics Division**, New York, v. 89, n. 6, p. 133-152, May 1963.
- BENDAT, J. S.; PIERSOL, A. G. **Random data: analysis and measurement procedures**. New York: John Miley & Sons, 2000, v. 3.
- BOUWS, Eda. **Guide to Wave Analysis and Forecasting**. Geneva, Suíça, 1998. Technical Bulletin WMO n. 702.
- BREA, J. D.; HOPWOOD, H. J.; AMORES, G. Protecciones de taludes com colchones sometidas a oleaje. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 14., 1990, Montevideo. **Anales...** Montevideo: Departamento de Publicaciones de la Universidad de la República, 1990. p. 1147-1158.
- BRIGHETTI, G.; MARTINS, J. R. S. **Estabilização e Proteção de Margens**. São Paulo. Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Universidade de São Paulo, 2001.
- COELHO, A. L. N. Geomorfologia fluvial de rios impactados por barragens. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 9, n. 26, p. 16-32, jun. 2008. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia/article/view/15721>>. Acessado em: 18 maio 2014.
- CONTERATO, E. **Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus**. 2014. 151 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- D'ARMADA, J. C. R.; ASSIREU, A. T.; VIANA, A. N. C.; RODRIGUES, A. de A. Erosões em margens de reservatórios: influências das ondas geradas pela ação do vento e da vegetação de proteção ciliar. SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 28., Rio de Janeiro, 2011. **Anais eletrônicos...** [S. l.: s. n.]. 2011. p. 1-20.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. Londres: World Scientific, 1984 (impr. 1995). v. 2.
- HUGHES, S. A. **Physical models and laboratory techniques in coastal engineering**. Londres: World Scientific, 1993 (impr. 2005). v. 7.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. **Sedimentation control of reservoirs: Guidelines**. Paris, 1989.
- LOPARDO, R. A.; VERNET, G. F. Ondas aguas abajo de dissipadores a resalto. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 8., 1978, Quito. **Anales...** p. 280-291.

MARQUES, M. **Sistema Automatizado para Estimativa de Ondas Geradas por Vento em Reservatórios de Barragens**. 2005. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, 2005.

NEVES, C. F.; MACIEL, G. F.; ROSAURO, N. M. L. Amortecimento de ondas por vegetação: uma estratégia para proteção de margens lacustres. In: SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA, 2., 2006, Rio Grande, RS. **Anais...** Rio Grande, RS: FURG, 2006. Não paginado.

PEREIRA, G. M., LOPES, M. L. Critérios e procedimentos para operação das comportas de vertedouros. SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 29. 2013, Porto de Galinhas, PE. **Anais eletrônicos...** [S. l.: s. n.]. 2013. p. 1-13. Disponível em <<https://www.yumpu.com/pt/document/view/12735658/modelo-xxvisngb-xxix-sngb>>. Acessado em 1 jun. 2014.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. Denver, USA: Bureau of Reclamation, 1958 (impr. 1984).

SANAGIOTTO, D. G. **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.