

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

**VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTO MACROTURBULENTO –
RESSALTO HIDRÁULICO A JUSANTE DE UMA COMPORTA**

Engenheiro Civil Jaime Federici Gomes

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação de Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito
parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia.**

Porto Alegre, abril de 2000

Para mamãe, papai (*in memorium*), irmãos e amigos.

Obrigado pela força.

UFRGS
BIBLIOTECA IPH

“Se, por um só momento, eu deixasse de agir, pereceria o mundo inteiro, vítima do caos – e minha seria a culpa da ruína da humanidade ...*

... O Senhor do Universo não cria ação, nem o impulso de agir, nem o desejo dos frutos da atividade —tudo isto nasce da natureza finita do indivíduo..

Assim como a chama reduz a cinzas a lenha, assim consome o fogo da sabedoria todas as ações e os efeitos da ação ...”

Krishna no Bhagavad Gita

** “Deus é pura atividade” (Aristóteles). “Meu Pai age sempre, e eu também ajo” (Jesus, o Cristo). A Realidade – dizem os grandes filósofos – não é um ser estático, mas um devir dinâmico.*

Apresentação

Este trabalho foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulico da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob a orientação do Prof. Marcelo Giulian Marques da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e co-orientado pelo Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e consiste em visualizar um escoamento macroturbulento (*é habitual designar por macroturbulência a agitação resultante dos vórtices de grandes dimensões existentes em certos escoamentos rapidamente variados, como é o caso do ressalto*) através da utilização de equipamentos de baixo custo de aquisição e de fácil operação (câmera de vídeo convencional e programa de tratamento de imagens disponível na Rede Mundial de Computadores - Internet).

O escoamento macroturbulento escolhido para aplicação da pesquisa foi o Ressalto Hidráulico em canal a jusante de uma comporta.

Agradecimentos

Agradeço a *University of Texas Health Science Center* em San Antonio, Texas, Estados Unidos da América por ceder o programa UTHSSA *Image Tool* para ambiente Windows versão 2.00 que auxiliou a concretização desse trabalho.

Agradeço a CAPES pela oportunidade de desenvolver este trabalho, como também, a confiança depositada neste pela Comissão de Pós – Graduação.

Agradeço as boas, divertidas e esclarecedoras conversas com meu orientador. No início foi difícil, mas conseguimos! Obrigado pela paciência.

Agradeço ao meu co - orientador. Suas idéias claras e seus questionamentos sensatos propiciaram muito a conclusão deste trabalho. Obrigado.

Aos diletos professores: Rogério Maestri (obrigado pelas discussões que me ajudaram a crescer), Alexandre Beluco (sem seu auxílio este trabalho não se concretizaria), Ana Luiza Borges (uma excelente professora), Edith Beatriz Schettini (sua didática e questionamentos me ajudaram muito), Paulo Kroeff de Souza (boas conversas e ajuda) e outros que, de uma certa forma, ajudaram na conclusão desse trabalho.

Aos funcionários Nadir Bueno Solari, Paulo Dolejal e Cesar Augusto Alves e a todos que de uma certa forma ajudaram no término deste trabalho, o meu muito obrigado.

Agradeço a dedicação e eficiência das amigas da biblioteca.

Aos colegas do mestrado e I.P.H agradeço de coração. Vocês me fizeram sentir como se eu estivesse em casa.

Aos meus colegas de sala, Juliano Rodrigues Gimenez, Paulo Henrique F. Ferreira , Sandro Concli Nassr e Samuel Fabian (antes tarde do que nunca!), obrigado e desculpa o mau humor. Não esquecerei a amizade e as farras.

Um especial abraço ao colega, amigo e irmão Vladimir Caramori Borges de Souza e a minha querida Regina Barbosa Speransa.

Resumo

O presente trabalho relata o estudo realizado no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na área de visualização de escoamentos, especificamente aplicado à pesquisa sobre macroturbulência em estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico. O processo de visualização do escoamento no interior de um ressalto hidráulico é complexo por tratar-se de um escoamento bifásico resultante de intensa turbulência. Isto obriga uma série de cuidados a fim de evitar a perda de informações no processo de conversão de uma imagem tridimensional (fenômeno físico) para imagem bidimensional (imagem digitalizada) e realçar os aspectos que sejam de interesse ao estudo. O objetivo geral deste trabalho consiste em visualizar as características externas e internas de um escoamento macroturbulento, no caso um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta, contribuindo com parâmetros de dimensionamento para estruturas hidráulicas que se utilizam deste fenômeno como forma de dissipação de energia. O trabalho passa por etapas de otimização de aspectos relacionados com o posicionamento, tipo e intensidade de iluminação visando a adequada visualização do fenômeno físico em função das características do equipamento de captura e tratamento das imagens com baixo custo de aquisição.

Palavras – Chave – visualização de escoamento, ressalto hidráulico, turbulência.

Abstract

The work described has been developed at the Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul in the field of flow visualization. It is specifically concerned with macroturbulence research in energy-dissipating structures by hydraulic jump. The process of flow visualization in hydraulic jumps is a fairly complex task because of the aerated two-phase flow and the high turbulence intensity. So care must be taken to avoid loss of information in the process of converting the three-dimensional image (physical phenomenon) to the two-dimensional image (digital image), and not to omit aspects of interest. This work sought to visualize the internal and external characteristics of the hydraulic jump downstream of a sluice gate and to optimize aspects such as the position, type and intensity of lights as a function of videocamera and softwares features used in the capture of the images, as well as, to provide design parameters for energy dissipating structures by hydraulic jump.

Sumário

1	Introdução	1
2	Relevância e Justificativa na Aplicação da Técnica de Visualização	3
3	Objetivos	4
4	Revisão Bibliográfica	5
4.1	Ressalto Hidráulico	5
4.2	Alturas Conjugadas em Fundo Plano	7
4.3	Altura Conjugada em Fundo Inclinado	9
4.4	Ressalto a Jusante de Comportas	11
4.5	Comprimento do Ressalto e do Rolo	13
4.5.1	Canal horizontal	13
4.5.2	Canal de fundo inclinado	14
4.6	Perfil do Ressalto	15
4.7	Escoamento bifásico e Aeração	17
4.8	Dissipação de Energia	18
4.9	Características Turbulentas no Ressalto	21
4.10	Perfil de Velocidade	22
4.11	Visualização do Ressalto Hidráulico	23
4.12	Efeito de Escala em Estudo de Modelo Reduzido	32
5	Instalações Experimentais	34
6	Caracterização do Problema	36
6.1	Camada limite a montante do ressalto hidráulico	37
6.1.1	Análise do escoamento a jusante de comporta para canal horizontal e seção retangular.	38
6.2	Caracterização do número de Froude rápido	41
7	Metodologia	43
7.1	Método de Visualização	43
7.2	Método de Digitalização de Imagem	45
7.3	Método de Análise das Imagens	48
7.4	Definição das Características do Ressalto Hidráulico	49
8	Resultados	52
8.1	Introdução	52
8.2	Descrição visual do fenômeno	52
8.3	Considerações para a obtenção das características externas e internas do Ressalto Hidráulico	59
8.4	Alturas Conjugadas	60
8.5	Coeficiente de correção entre o perfil curvo e retilíneo do ressalto - K	61
8.6	Comprimento do Rolo e do Ressalto	62
8.7	Características Oscilatórias do Ressalto Hidráulico	64

8.7.1	Início do Ressalto _____	64
8.7.2	Propagação de ondas para jusante _____	70
8.7.3	Posições de início e fim do ressalto e do rolo - Comparações _____	73
8.7.4	Comparações entre as linhas de água da superfície _____	76
8.7.4.1	Valores médios da linha de água da superfície nos pontos do final e comprimento do rolo __	76
8.7.4.2	Análise sobre a flutuação da linha de água na superfície _____	77
8.7.4.3	Análise das variações ao longo do ressalto _____	80
8.7.4.4	Turbilhões – Posição e Tamanhos _____	83
8.8	Análise de Erros _____	85
9	Conclusões _____	86
9.1	Técnica de Visualização _____	86
9.2	Características Oscilatórias e Médias do Ressalto Hidráulico _____	88
10	Recomendações _____	90
10.1	Técnica de Visualização _____	90
10.2	Instalações _____	91
10.3	Técnica de Medida para Retirada dos Dados _____	91
10.4	Fenômeno _____	92
11	Referências Bibliográficas _____	93
A.	Anexo A: Métodos de Aferição dos Instrumentos de Medição _____	A.1
A.1.	Introdução _____	A.2
A.2.	Ponta Linimétrica _____	A.2
A.2.1.	Metodologia _____	A.2
A.2.2.	Resultados _____	A.3
A.3.	Vazão _____	A.3
A.3.1.	Medições de Velocidades _____	A.4
A.3.2.	Resultados _____	A.5
A.4.	Padronizações _____	A.5
B.	Anexo B - Análise Dimensional _____	B.1
B.1.	Introdução _____	B.2
B.2.	Análise Dimensional Genérica sobre as Características do Ressalto Hidráulico _____	B.2
B.2.1.	Características e dimensões básicas _____	B.2
B.2.1.1.	Escoamento _____	B.2
B.2.1.2.	Geométrica _____	B.3
B.2.1.3.	Fluido _____	B.4
B.3.	Teorema de Buckingham _____	B.4
B.3.1.	Matriz dimensional _____	B.5
B.3.2.	Grupos Adimensionais _____	B.5
B.4.	Efeito de redução de escala aplicada à modelação do ressalto no experimento. _____	B.7
B.5.	Conclusões _____	B.8

Índice de Figuras

Figura 4.1. - Tipos de ressalto em função do número de Froude na seção de entrada conforme apresentado em Peterka (1974).	6
Figura 4.2 - Tipos de ressalto a jusante de vertedor. A é o ressalto livre no pé do vertedor, B é o ressalto afogado e C1 é o ressalto clássico (livre), conforme apresentado em Hager (1992).	6
Figura 4.3 - Esquema de forças dentro do ressalto para cálculo da relação de alturas conjugadas em canais de fundo inclinado conforme publicado em Chow (1959).	9
Figura 4.4 - Alturas conjugadas em um ressalto inclinado (adaptado de Chow, 1959).	11
Figura 4.5 - Ressalto hidráulico afogado a jusante de comporta.	11
Figura 4.6 - Comprimento do ressalto segundo diversos autores conforme publicado em Pinheiro (1995).	13
Figura 4.7 - Comprimento do ressalto para diversos números de Froude adaptado de Chow (1959).	14
Figura 4.8 - Comprimento do ressalto em canais com fundo inclinado para diferentes números de Froude adaptado de Chow (1959).	15
Figura 4.9 - Perfil do Ressalto adaptado de Bakhmeteff e Matzke (1946).	16
Figura 4.10 - Perfil do Ressalto adaptado de Rajaratnam e Subramanya em 1968.	17
Figura 4.11 - Esquema de entrada e saída de ar em um ressalto.	18
Figura 4.12 - Eficiência do ressalto hidráulico de acordo com o número de Froude adaptado de Peterka (1957).	19
Figura 4.13 - Dissipação de energia do ressalto em um canal inclinado adaptado de Rajaratnam (1966).	20
Figura 4.14 - Porcentagem de energia dissipada ao longo do ressalto conforme apresentado em Marques et al. (1998).	20
Figura 4.15 - Perfil de Velocidade apresentado McCorquodale e Khalifa (1983) para $Fr1 = 6$.	23
Figura 4.16 - Distribuição do diâmetro médio das bolhas de ar, em milímetros, no ressalto hidráulico para Froude 2,85, conforme publicado e traduzido de Resch e Leutheusser (1974).	24
Figura 4.17 - Correntes e zonas de bolhas ao longo do ressalto para Froude 6 conforme apresentado por Long et al. (1991).	27
Figura 4.18 - Escalas dos turbilhões ao longo do ressalto. A esquerda é para Froude 6 e da direita para número de Froude 4 (Long et al., 1991).	27
Figura 4.19 - Variação das dimensões dos turbilhões no ressalto de acordo com sua posição. Adaptado de Long et al. (1991).	28
Figura 4.20 - Variações do início do ressalto apresentado por Long et al. (1991).	29
Figura 4.21 - Esquema do acoplamento de turbilhões vizinhos proposto por Long et al. (1991).	29
Figura 5.1 - Representação da Instalação Experimental.	35

<i>Figura 6.1 – Esquema para análise teórica do desenvolvimento da camada limite a montante do ressalto hidráulico.</i>	38
<i>Figura 7.1 – Esquema de iluminação acima do ressalto com um nível de iluminação de 5500 LUX.</i>	44
<i>Figura 7.2 – Esquema Ilustrativo do final e comprimento do rolo e final do ressalto.</i>	51
<i>Figura 8.1 – Acoplamento entre turbilhões vizinhos entre 5 e 8 x/h_1 para Froude 2,9.</i>	55
<i>Figura 8.2 – Fenômeno de interação entre ondas superficiais – turbilhões no interior do ressalto para número de Froude 2,9.</i>	57
<i>Figura 8.3 - Relação entre alturas conjugadas para valores do número de Froude e comparação com diversos autores.</i>	60
<i>Figura 8.4 – Esquema ilustrativo da determinação do coeficiente K.</i>	61
<i>Figura 8.5 - Coeficiente K de correção do perfil longitudinal para valores de número de Froude.</i>	62
<i>Figura 8.6 - Comprimento do rolo e do ressalto obtidos para valores do número de Froude e comparações entre diversos autores.</i>	63
<i>Figura 8.7 - Variação da posição inicial do ressalto em função do tempo.</i>	65
<i>Figura 8.8 - Análise da máxima amplitude de variação da posição relativa do início do ressalto em função do número de Froude rápido.</i>	67
<i>Figura 8.9 - Histograma de freqüências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para números de Froude 2,9, 3,8 e 7,0.</i>	68
<i>Figura 8.10 - Histograma de freqüências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para o número de Froude 2,9.</i>	68
<i>Figura 8.11 - Histograma de freqüências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para o número de Froude 3,8.</i>	69
<i>Figura 8.12 - Histograma de freqüências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para o número de Froude 7,0.</i>	69
<i>Figura 8.13 - Amplitude de ondas que se propagam a jusante da dissipação de energia em função do número de Froude.</i>	71
<i>Figura 8.14 - Posição da crista da onda a jusante do ressalto em função do número de Froude.</i>	72
<i>Figura 8.15 - Variação da posição ao longo do comprimento do canal e do tempo para número de Froude 2,9.</i>	73
<i>Figura 8.16 - Variação da posição ao longo do comprimento do canal e do tempo para número de Froude 3,8.</i>	74
<i>Figura 8.17 - Variação da posição ao longo do comprimento do canal e do tempo para número de Froude 7.</i>	74

<i>Figura 8.18 - Profundidade do escoamento no final do rolo para diferentes números de Froude.</i>	77
<i>Figura 8.19 - Análise da variação da linha de água da superfície do ressalto ao longo do tempo nas seguintes posições longitudinais: comprimento e final do rolo e fim do ressalto, para Froude 2,9.</i>	78
<i>Figura 8.20 – Análise da variação da linha de água da superfície do ressalto ao longo do tempo nas seguintes posições longitudinais: comprimento e final do rolo e fim do ressalto, para Froude 3,8.</i>	78
<i>Figura 8.21 - Análise da variação da linha de água da superfície do ressalto ao longo do tempo nas seguintes posições longitudinais: comprimento e final do rolo e fim do ressalto, para Froude 7,0.</i>	79
<i>Figura 8.22 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 2,9.</i>	80
<i>Figura 8.23 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 3,8.</i>	81
<i>Figura 8.24 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 7,0.</i>	81
<i>Figura 8.25 – Profundidades medidas da linha de água da superfície (hp) [◇] e do núcleo potencial (hr) [●] ao longo do ressalto para todos os números de Froude e tendência médias dos dados experimentais.</i>	82
<i>Figura 8.26 - Posição do centro de 9 turbilhões sucessivos com intervalo de tempo de 0,04 s para número de Froude 2,9.</i>	84
<i>Figura 8.27 - Dimensão vertical de 9 turbilhões sucessivos espaçados no tempo de 0,04 s para número de Froude 2,9.</i>	84

Índice de Tabelas

<i>Tabela 6.1 – Dados experimentais.</i>	42
<i>Tabela 8.1 – Características estatísticas da variação da posição inicial relativa $(\Delta x/h_1)$ do ressalto obtidos e comparados com Long et al. (1991).</i>	66
<i>Tabela 8.2 – Características estatísticas da variação da posição relativa $[\Delta x/(h_2-h_1)]$ de início do ressalto em função do número de Froude e média zero.</i>	70
<i>Tabela 8.3 – Estatística descritiva das ondas que se propagam para jusante para diferentes números de Froude.</i>	72
<i>Tabela 8.4 – Estatística descritiva da variação da posição relativa $[\Delta x/(h_2-h_1)]$ longitudinal do comprimento do rolo, fim do rolo e fim do ressalto.</i>	75
<i>Tabela 8.5 – Estatística descritiva da variação relativa $[(\Delta h-h_1)/(h_2-h_1)]$ da linha de água da superfície no comprimento e final do rolo.</i>	79

Lista de Símbolos

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
b	largura do canal (m)
f	freqüência (s^{-1})
g	aceleração da gravidade ($m.s^{-2}$)
h	coordenada vertical em relação ao fundo do canal (m)
h_0	altura do escoamento na vena contracta (m)
h_1	altura conjugada rápida (m)
h_2	altura conjugada lenta (m)
h_p	profundidade da linha de água da superfície do ressalto (m)
h_r	profundidade da linha inferior do escoamento do rolo (m)
l	comprimento do vertedor (m)
p	paramento do vertedor (m)
w	relação entre a altura conjugada rápida e a largura do canal
w_L	relação proposta por Hager e Bremen (1989) para efeito de escala no ressalto
x	coordenada longitudinal a partir do início do ressalto (m)
C_f	coeficiente local de cisalhamento
Fr_1	número adimensional de Froude na seção da altura conjugada rápida
H_1	energia do escoamento a montante do ressalto (m)
H_2	energia do escoamento a jusante do ressalto (m)

I	declividade do fundo do canal em graus
J	relação entre U e U_0
L_{fj}	final do rolo
L_j	comprimento do ressalto
L_{rj}	comprimento do rolo
L_{sj}	comprimento do ressalto afogado
L_x	dimensão horizontal do turbilhão (m)
L_y	dimensão vertical do turbilhão (m)
Q	vazão ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
Re	número adimensional de Reynolds na <i>vena contracta</i>
Re_1	número adimensional de Reynolds na seção da altura conjugada rápida
S	fator de submergência
S_0	declividade do canal em $\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$
S_f	força de cisalhamento no fundo do canal
U	velocidade média na seção ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
U_0	velocidade média na vena contracta ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
V_1	velocidade na seção da altura conjugada rápida ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
V_i	velocidade média local ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
X	posição longitudinal qualquer dentro do ressalto (m)
Z	carga de água a montante da comporta (m)

Letras gregas

<i>Símbolo</i>	<i>Descrição</i>
ν	viscosidade cinemática ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
δ	espessura da camada limite (m)
ρ	massa específica da água ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
σ	tensão superficial da água ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)
η	eficiência de dissipação de energia no

	ressalto (%)
ξ	módulo de elasticidade da água ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$)
θ	espessura de quantidade de movimento da camada limite (m)
π	designação para grupo adimensional
δ^*	espessura de descolamento da camada limite (m)
τ_0	tensão de cisalhamento (N.m^{-2})
ΔH	dissipação de energia ao longo do ressalto (m)
σ_0	declividade da curva inferior que separa o rolo do ressalto do escoamento potencial

1 Introdução

Este trabalho encontra-se dividido em duas partes. A primeira visa introduzir o leitor ao assunto Ressalto Hidráulico, sua história e sua relevância para a comunidade científica da área de Recursos Hídricos, Saneamento Ambiental e Engenharia. A segunda é caracterizada pelo desenvolvimento da parte experimental da presente pesquisa e seus resultados.

A primeira parte é dividida em *Introdução, Relevância, Objetivos e Revisão Bibliográfica*. Nesta última o ressalto hidráulico é abordado de forma geral, introduzindo características que vão desde a primeira observação feita por Leonardo da Vinci no século XV e a formulação de altura conjugada de Bidone, até a mais atual análise do fenômeno proposta por Mossa e Tolve (1998), que visualizou o ressalto utilizando digitalização de imagens como aqui proposto.

A segunda parte é dividida em *Instalações Experimentais, Caracterização do Problema, Metodologia, Resultados, Conclusões, Recomendações e Anexos*. O capítulo de Caracterização do Problema visa descrever o fenômeno do ressalto e as principais recomendações para sua análise. Em complemento a este capítulo, são apresentados dois anexos que auxiliam no seu entendimento. Em Metodologia são descritas as técnicas de visualização aplicadas aos ensaios do ressalto hidráulico especificando padrões de utilização dos equipamentos e a importância na adoção de cada um.

O capítulo de Resultados apresenta, em forma de gráficos, tabelas e esquemas explicativos, as características externas e internas do ressalto relacionando-as entre si, como também, descrevendo o processo de dissipação de energia com base nos resultados obtidos. As características externas são aquelas macroscópicas que se visualizam de fora do ressalto, citando-se as posições de início e fim do ressalto, o final do rolo e a superfície da linha de água. Já as características internas são aquelas do corpo do ressalto que, para sua descrição, são necessários métodos especiais, como visualização, anemometria térmica e outros. Entre estas características internas pode-se citar a linha divisória entre o escoamento aerado e não aerado, o comprimento do rolo (definido no item 7.4) e os turbilhões. É importante salientar que as definições adotadas para as características externas e internas do ressalto não estão relacionadas com as definições das propriedades internas e externas da camada limite.

Os capítulos seguintes apresentam uma análise e resumo da metodologia utilizada e dos resultados obtidos, discutindo também, os problemas enfrentados e as soluções adotadas.

Em síntese, este trabalho visa a compreensão do fenômeno através da visualização de suas características macroturbulentas e da tentativa de relacioná-las, a fim de contribuir com parâmetros de dimensionamento de estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico.

2 Relevância e Justificativa na Aplicação da Técnica de Visualização

O ressalto hidráulico é a maneira mais simples adotada para dissipar energia. Esta dissipação é acompanhada por uma forte turbulência apresentando flutuações na superfície da água, refluxos e surgimento de grandes turbilhões, não existindo um consenso sobre a sua caracterização.

A visualização do escoamento através da captura de imagens, com uma determinada frequência, e o tratamento destas imagens, possibilita determinar as características médias e instantâneas e seu desenvolvimento ao longo do tempo.

A característica bifásica do escoamento no ressalto hidráulico permite estabelecer as características internas e externas do fenômeno sem a utilização de traçadores que poderiam afetar as propriedades do fluido, modificando a estrutura original do escoamento e evitando ensaios para adequação de traçadores.

O conhecimento dessas características internas e externas da dissipação de energia no ressalto hidráulico é de interesse permanente dos engenheiros hidráulicos, afetando diretamente o dimensionamento das estruturas que os conterá.

Optou-se pelo ressalto hidráulico a jusante de uma comporta por diversos motivos. Primeiro pode-se citar o trabalho de Resch e Leutheusser (1974) que apresenta a existência de uma diferença entre as características internas e externas do ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta e o a jusante de um vertedor. Segundo que a comporta permite maior flexibilidade na obtenção do número de Froude que um ressalto a jusante de um vertedor, além do que, grande parte da literatura sobre técnicas de visualização do ressalto hidráulico foram aplicadas a essa estrutura, facilitando assim, comparações para determinar a eficiência da técnica aqui desenvolvida. Por último, essa escolha visa ampliar a linha de pesquisa que vem sendo desenvolvida no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Endres, 1990; Marques et al., 1997) no estudo de ressalto hidráulico a jusante de vertedor.

3 Objetivos

O objetivo geral do estudo consiste em desenvolver uma técnica de visualização de baixo custo aplicada a um escoamento macroturbulento, como o verificado em um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta, visualizando suas características externas e internas, com diferentes valores de números de Froude, a fim de compreender o fenômeno, contribuindo para a otimização de diretrizes de projetos de estruturas hidráulicas de dissipação de energia por ressalto hidráulico.

Com o objetivo de determinar a eficiência da técnica desenvolvida serão comparados e discutidos os resultados obtidos com os de outros autores que trabalharam com técnicas diferentes, confirmando-os ou não.

Em uma primeira etapa, o autor determinou com o auxílio de trabalhos prévios na literatura:

- uma metodologia alternativa de visualização de escoamento adequada às instalações experimentais encontradas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas e, principalmente;
- métodos de digitalização de imagens que não requerem equipamentos de altos custos;

Com o intuito de determinar a eficiência da técnica desenvolvida propôs-se:

- determinar os níveis médios e instantâneos de água no interior do ressalto, identificando:
 - _ as flutuações verticais do perfil e do rolo no mesmo ponto longitudinal, avaliadas no mesmo instante, relacionando-as entre si;
 - _ as flutuações longitudinais do início, do comprimento do rolo e do ressalto relacionando-as entre si;
- verificar como se desenvolve o rolo e o escoamento não aerado, através da compreensão do processo de formação e dissipação dos turbilhões em seu interior.

4 Revisão Bibliográfica

Existem muitas formulações que descrevem o fenômeno denominado Ressalto Hidráulico, no entanto neste trabalho serão apresentadas as mais difundidas a fim de auxiliar a compreensão de suas características.

4.1 *Ressalto Hidráulico*

O ressalto hidráulico é o fenômeno que ocorre nos escoamentos em canais quando se dá a passagem do regime supercrítico para subcrítico em uma curta distância, ocorrendo uma rápida diminuição da velocidade média do escoamento, como consequência da transformação da energia cinética em potencial, com aeração do escoamento líquido. Este fenômeno, entre outras utilidades, é empregado para dissipação de energia hidráulica em estruturas. Suas principais características são:

- escoamento altamente turbulento;
- dissipação de energia devido à alta turbulência do escoamento;
- pulsação de seu corpo;
- propagação de ondas superficiais a jusante;
- entrada de ar;
- grande potencial erosivo, em função de grande flutuação de pressão junto aos contornos do canal.

O ressalto hidráulico pode ser classificado em função do número de Froude em sua seção de entrada. Esta classificação, conforme o autor que a sugere, pode sofrer pequenas alterações quanto ao limite do número de Froude. Peterka (1974) sugere uma classificação em 4 tipos (Figura 4.1.): o pré-ressalto ($1,7 \leq Fr_1 < 2,5$), ressalto oscilatório ($2,5 \leq Fr_1 < 4,5$), o ressalto estável ($4,5 \leq Fr_1 < 9,0$) e o ressalto forte ($Fr_1 \geq 9,0$).

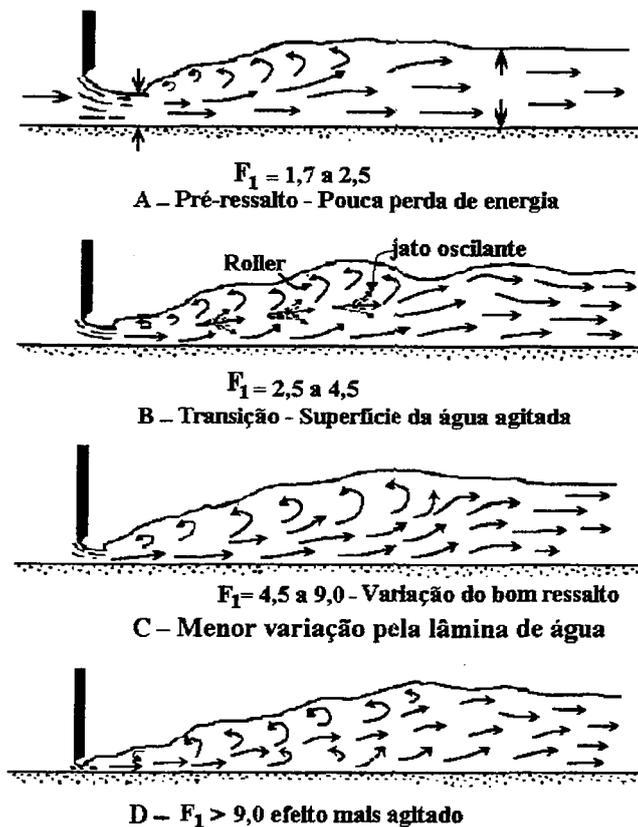


Figura 4.1. - Tipos de ressalto em função do número de Froude na seção de entrada conforme apresentado em Peterka (1974).

A posição do início do ressalto hidráulico depende, principalmente, das condições de contorno do canal e o tipo de estrutura que o precede (comporta na Figura 4.1. ou vertedor na Figura 4.2), podendo se formar livre ou afogado.

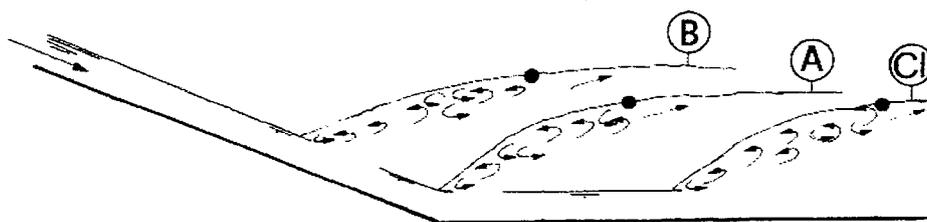


Figura 4.2 - Tipos de ressalto a jusante de vertedor. A é o ressalto livre no pé do vertedor, B é o ressalto afogado e C1 é o ressalto clássico (livre), conforme apresentado em Hager (1992).

O ressalto hidráulico, além de funcionar como dissipador de energia, pode ser utilizado como método de mistura de produtos químicos ou aerador de escoamentos em tratamentos de água e esgoto, por exemplo.

A primeira descrição de um ressalto hidráulico vem do século XV feita por Leonardo da Vinci. Em seguida tem-se registro do livro de Guglielmini de 1739, “*Dalla natura del*

fiumi” que precedeu o primeiro trabalho experimental de que se tem notícia, o salto de Bidone em 1820.

4.2 Alturas Conjugadas em Fundo Plano

Bidone em 1820 observando a relação entre descarga e profundidade de escoamento, baseado no princípio de conservação de massa, testou para uma faixa de vazões e de as alturas rápidas, a altura que se originaria depois do ressalto, apresentando assim a primeira relação de alturas conjugadas (Equação 4.1). Bidone assumiu que o ganho de altura representaria uma perda em taqui-carga. O problema foi que a lei estipulada por Bidone não representava com fidelidade os dados experimentais.

$$h_2 - h_1 = \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} \quad (4.1)$$

Oito anos mais tarde, Jean Baptiste Bélanger, em 1828, com os dados experimentais de Bidone, descobriu discrepâncias de até 14% com os resultados da fórmula. Então Bélanger decidiu partir para outra abordagem do problema e utilizando o princípio de conservação de quantidade de movimento de Newton, elaborou a fórmula atualmente usada para o cálculo teórico das alturas conjugadas (Equação 4.2):

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[\left(1 + 8Fr_1^2 \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (4.2)$$

onde :

h_1 = altura conjugada rápida a montante do ressalto (entrada do ressalto);

h_2 = altura conjugada lenta a jusante do ressalto (saída do ressalto);

Fr_1 = número de Froude correspondente a h_1 .

Bélanger assumiu, entre as alturas de entrada e saída do ressalto, características como:

- distribuição hidrostática de pressão;
- perfil uniforme de velocidade;
- canal de seção transversal retangular;
- canal com fundo horizontal e desenvolvimento reto;
- efeitos de entrada de ar desprezíveis e
- profundidade à jusante variando em torno de uma média.

Existe uma lacuna entre o trabalho de Bélanger e as formulações de alturas conjugadas mais recentes. Isso se deve à formulação de Bélanger apresentar pequenos desvios entre seus resultados e os obtidos experimentalmente. Então era inviável abordar todas as variáveis que o problema apresenta em apenas uma formulação. Com o avanço das ferramentas de cálculos foram então retomadas novas análises que serão apresentadas a seguir.

Hager e Bremen (1989) demonstraram uma relação de alturas conjugadas para canais retangulares e de fundo plano indicando parâmetros relevantes ao fenômeno. Associando a tensão de cisalhamento com o grau de turbulência e a relação entre as forças de inércia e gravitacionais no cálculo da relação de alturas conjugadas, os autores chegaram à seguinte formulação:

$$1 + 2Fr_1^2 = \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^2 + 2Fr_1^2 \left(\frac{h_1}{h_2}\right) + \frac{0,2}{2^{1,2}} Fr_1^2 Re_1^{-1/5} \lambda_r \frac{1}{\sigma_0 \left(\frac{h_2}{h_1} - 1\right)} \cdot \left[\frac{\sigma_0 \left(\frac{h_2}{h_1} - 1\right)}{1 + \sigma_0 \left(\frac{h_2}{h_1} - 1\right)} + 1,2w \cdot \ln \left(1 + \sigma_0 \left(\frac{h_2}{h_1} - 1\right) \right) \right] \quad (4.3)$$

$$\sigma_0 = 0,41 \cdot \exp \left[\frac{1}{7} (4 - Fr_1) \right] \quad (4.4)$$

$$\lambda_r = 6,29Fr_1 - 3,59 \quad (4.5)$$

onde:

Re_1 é o número de Reynolds na posição da altura conjugada rápida;

σ_0 é a declividade da curva inferior que separa o rolo do ressalto do escoamento potencial;

w é a relação entre a altura conjugada rápida e a largura do canal;

λ_r é o comprimento do rolo sugerido pelos autores.

Ohtsu e Yasuda (1994) para as mesmas características do ressalto analisado pelos autores anteriores, também frisaram a importância da tensão de cisalhamento junto ao perímetro molhado do canal em um escoamento potencial a jusante de uma comporta, propondo uma formulação prática e de fácil utilização, diferente de Hager e Bremen (1989).

$$\left(\frac{h_2}{h_1}\right)^3 - \{2Fr_1^2 + 1 - S_f\} \left(\frac{h_2}{h_1}\right) + 2Fr_1^2 = 0 \quad (4.6)$$

$$S_f = 0,12(Fr_1 - 1)^2 \quad (4.7)$$

onde:

S_f é a força de cisalhamento no fundo do canal, válida somente para números de Froude entre 3 e 10.

É importante salientar que todas as relações partem do Princípio de Conservação de Quantidade de Movimento combinada à Conservação de Massa. As formulações apresentadas por Hager e Bremen (1989) e Ohtsu e Yasuda (1994) conseguem abordar de forma mais completa o fenômeno sendo válidas comparações com os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa, apesar de ambas serem derivadas tanto de conceitos teóricos quanto resultados experimentais.

4.3 Altura Conjugada em Fundo Inclinado

Quando da análise de ressaltos hidráulicos em canais com declividade apreciável (pela literatura declividades de fundo maiores e iguais a 0,05 m/m), deve-se levar em consideração o peso da água no cálculo das alturas conjugadas.

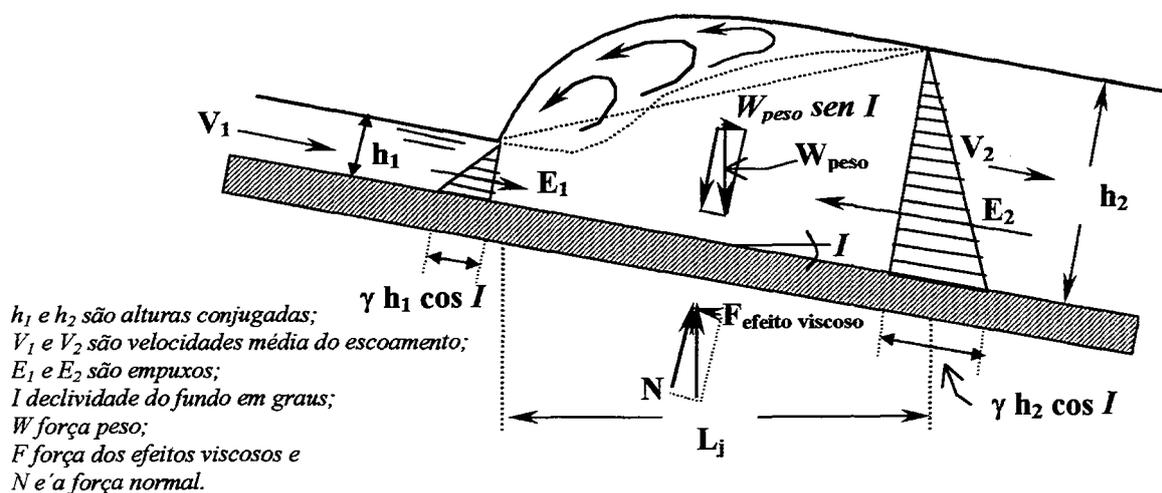


Figura 4.3 - Esquema de forças dentro do ressaltos para cálculo da relação de alturas conjugadas em canais de fundo inclinado conforme publicado em Chow (1959).

Analisando a equação de conservação de quantidade de movimento para um canal de declividade apreciável, Kindsvater (1944) apud Chow (1959), obteve a seguinte relação:

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2} \left[(1 + 8G^2)^{1/2} - 1 \right] \quad (4.8)$$

onde:

G é uma função dada por:

$$G = \frac{Fr_1}{\left(\cos I - \frac{KL_j \operatorname{sen} I}{h_2 - h_1} \right)^{1/2}} \quad (4.9)$$

sendo:

K = fator de correção da área para a hipótese de assumir o perfil linear da lâmina de água no ressalto;

Rajaratnam (1966) apud Hager (1992), dá a seguinte equação para G^2 :

$$G^2 = \left(10^{0,027 \times I} \right)^2 Fr_1^2 \quad (4.10)$$

onde I é a inclinação do canal em graus.

Husain et al. (1995) apresentam uma solução prática e empírica para determinação do fator K e da relação de altura conjugada em canais inclinados:

$$K = 1,152 + 0,025I + 0,031Fr_1 \quad (4.11)$$

$$\frac{h_2}{h_1} = -74,85 + 63,305K - 0,695I - 0,369Fr_1 \quad (4.12)$$

onde I é declividade do canal em graus.

Devido à dificuldade de resolução da equação (4.8), diversos autores como Kindsvater (1944), Hickox (1944), Bakhmeteff e Matzke (1938) e Bradley e Peterka (1957) apud Chow (1959) determinaram experimentalmente uma relação entre o valor do número de Froude rápido e as alturas conjugadas (Figura 4.4), sendo S_0 a declividade do fundo do canal em *m/m*.

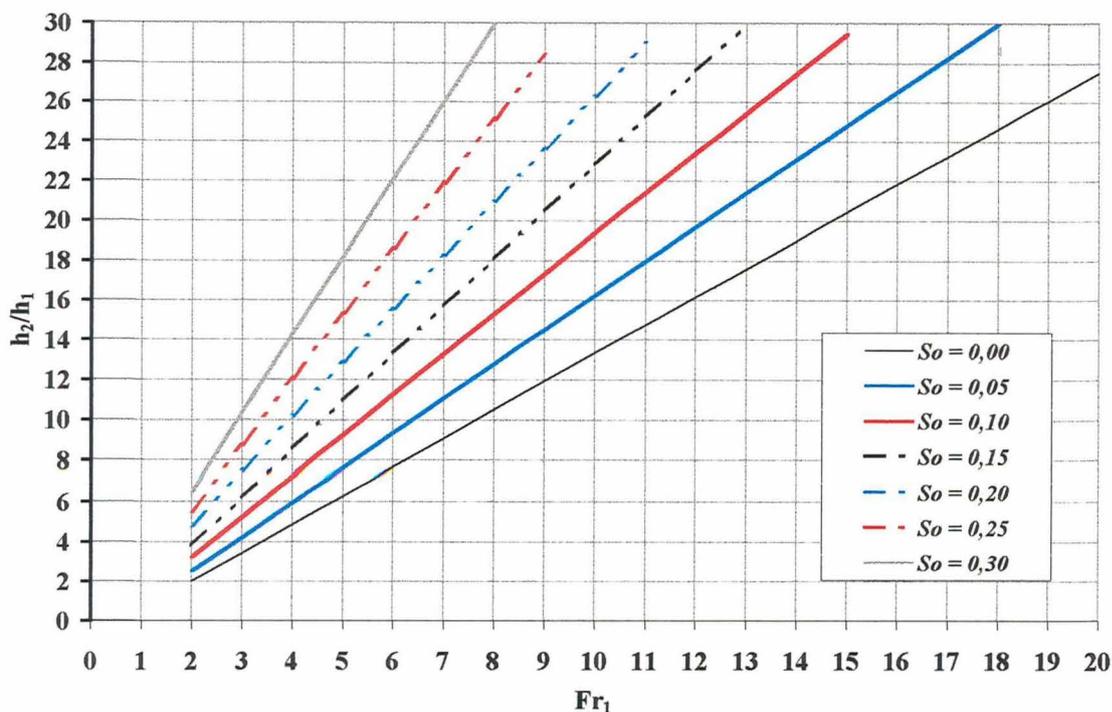


Figura 4.4 - Alturas conjugadas em um ressalto inclinado (adaptado de Chow, 1959).

4.4 Ressalto a Jusante de Comportas

A diferença entre o ressalto a jusante de uma comporta (Figura 4.5) e a jusante de um vertedor (Figura 4.2) é a condição da camada limite a montante do ressalto, propiciando características turbulentas diferentes (Resch e Leutheusser, 1974). Tanto ressalto hidráulico formado a jusante de uma comporta como de um vertedor pode ser livre ou afogado.

O ressalto hidráulico afogado caracteriza-se por uma altura conjugada lenta (h_2), calculada a partir da altura conjugada rápida (h_1), menor do que a altura de água que realmente ocorre a jusante (h_3), conforme ilustrado na Figura 4.5.

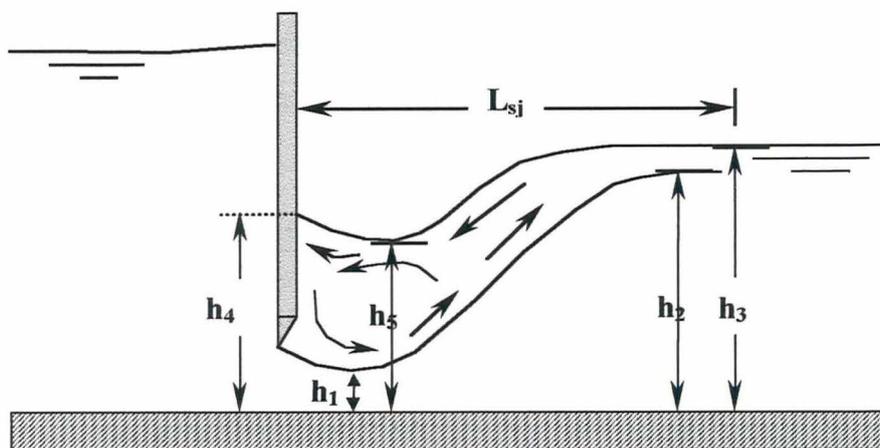


Figura 4.5 - Ressalto hidráulico afogado a jusante de comporta.

Na medida em que o ressalto afoga, as entradas de ar na superfície da linha de água e no início são obstruídas porque diminui a pulsação do corpo do ressalto. Primeiramente a eficiência na dissipação de energia tende a aumentar, até um certo grau de afogamento, a partir do qual, começa a diminuir em relação ao ressalto livre (Rajaratnam, 1967). Esse esquema foi apresentado por Rajaratnam (1965.a) apud Vischer e Hager (1995) sendo o ressalto afogado caracterizado pelo número de Froude rápido e por um fator de submergência denominado S dado por:

$$S = \frac{h_3 - h_2}{h_2} \quad (4.13)$$

Rajaratnam (1965.a) apud Vischer e Hager (1995) introduziu, para $Fr_1 > 2$ e $S > 0$, a seguinte relação entre a altura rápida (h_1) e a altura imediatamente a jusante da comporta (h_4):

$$\frac{h_4}{h_1} = \sqrt{2} Fr_1 [S(2 + S)]^{1/2} \quad (4.14)$$

A altura mínima entre a comporta e o final do ressalto (h_5) (Figura 4.5) pode ser descrita pela relação:

$$\frac{h_5}{h_1} = 1 + (S + 0,2) Fr_1^{1,28} \quad (4.15)$$

Apesar da condição apresentada por Resch e Leutheusser (1974) referentes às características turbulentas no ressalto, não há distinção na literatura entre as formulações para determinar as macrocaracterísticas do ressalto livre a jusante de uma comporta e a jusante de um vertedor. A condição da camada limite a montante do ressalto depende da distância entre a estrutura e o início do ressalto, podendo encontrar-se desenvolvida ou não. Segundo os critérios usuais de dimensionamento que posicionam o ressalto junto à estrutura que o precede, é mais provável que a camada limite a montante do ressalto livre a jusante de um vertedor esteja completamente desenvolvida, diferentemente de uma camada limite a jusante de uma comporta. Essa condição acarreta pequenas diferenças nos cálculos das alturas conjugadas e comprimento do ressalto, mas não interferem no dimensionamento dessas estruturas. Deve-se ficar atento que essa condição é importante para análise das características turbulentas do ressalto.

No decorrer do presente trabalho serão tratados somente os ressaltos livres.

4.5 Comprimento do Ressalto e do Rolo

Não existe um consenso na literatura no que se refere à determinação do ponto onde terminam as influências do rolo e do ressalto, sendo então, adotados diferentes critérios para suas caracterizações:

- local onde a altura do ressalto encontra a altura conjugada lenta;
- local onde terminam as perturbações causadas pelo ressalto e
- local onde não há grandes variações de níveis.

4.5.1 Canal horizontal

Diversos autores pesquisaram o comprimento do ressalto, sendo aqui, apresentadas as proposições mais difundidas.

Safranez (1929) apud Chow (1959) apresentou a primeira relação para o comprimento do rolo (L_{rj}) em um canal horizontal:

$$\left(\frac{L_{rj}}{h_1} \right) = 6 \times Fr_1 \quad (4.16)$$

Rajaratnam (1967) apresentou o comprimento do ressalto hidráulico e do rolo em função do número de Fr_1 . Pode-se observar (Figura 4.6) que, para $Fr_1 > 4,5$ esta relação é praticamente constante e igual $6,1 h_2$ (comprimento do ressalto) e $4,5 h_2$ (comprimento do rolo), sendo h_2 igual à altura lenta.

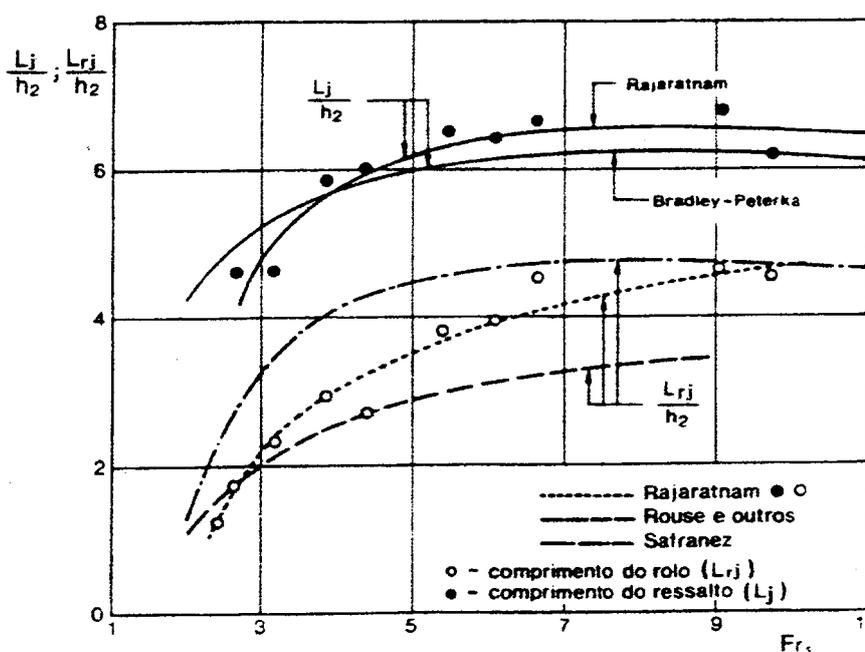


Figura 4.6 - Comprimento do ressalto segundo diversos autores conforme publicado em Pinheiro (1995).

Outra proposta foi apresentada pelo U.S. Bureau of Reclamation (1955) apud Chow (1959) (Figura 4.7).

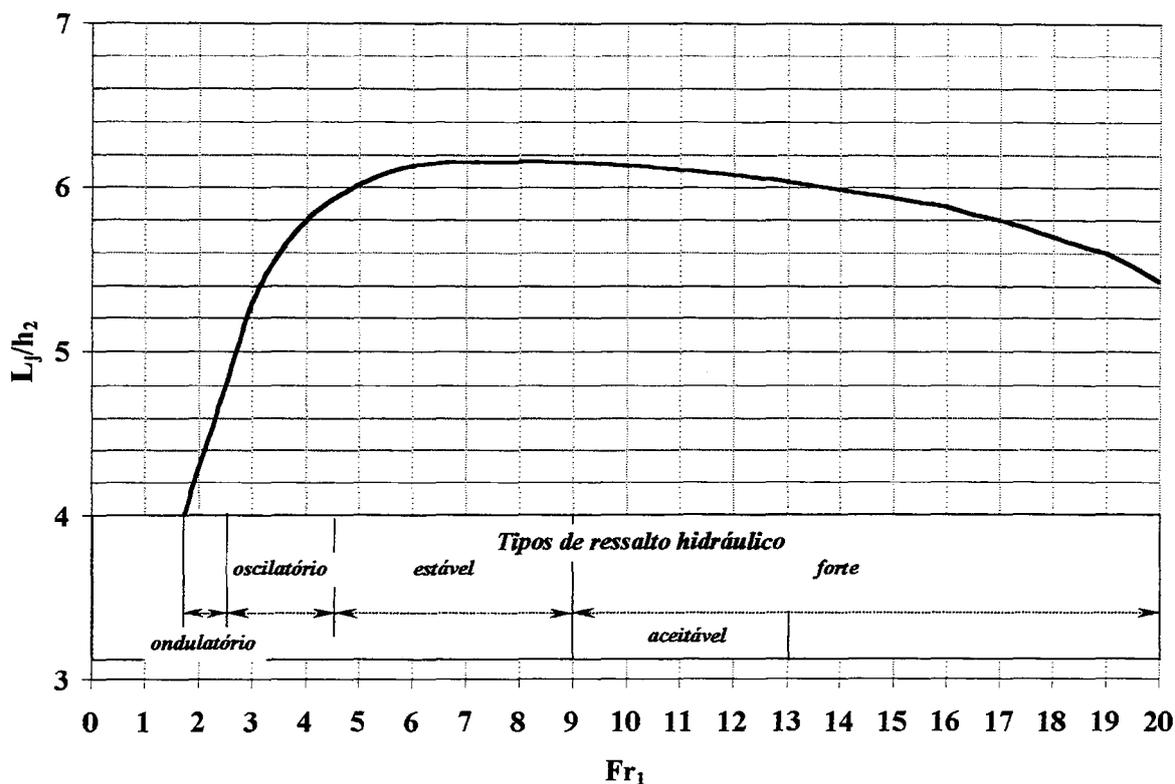


Figura 4.7 - Comprimento do ressalto para diversos números de Froude adaptado de Chow (1959).

A proposta do U.S.B.R. (1955) abrange maior faixa de número de Froude indicando uma tendência à diminuição do comprimento adimensionalizado do ressalto a partir do número de Froude 9, que não é abordado pelos resultados de Rouse et al. (1959) e Rajaratnam (1967). Há uma tendência do comprimento do ressalto permanecer constante quando o ressalto formado é do tipo estável na faixa de número de Froude 6 a 9.

Elevatorski (1959) sugere a seguinte expressão para o comprimento do ressalto:

$$L_j = 6,9 (h_2 - h_1) \quad (4.17)$$

Rajaratnam (1965.a) apud Vischer e Hager (1995) apresentou para o ressalto afogado a seguinte formulação para seu comprimento (Figura 4.5):

$$\frac{L_{sj}}{h_2} = 4,9S + 6,1 \quad (4.18)$$

4.5.2 Canal de fundo inclinado

O U.S. Bureau of Reclamation (1955) apud Chow (1959), apresentou uma relação entre os números de Froude rápidos e o comprimento do ressalto para canais com diferentes declividades (S_0 em m/m) (Figura 4.8).

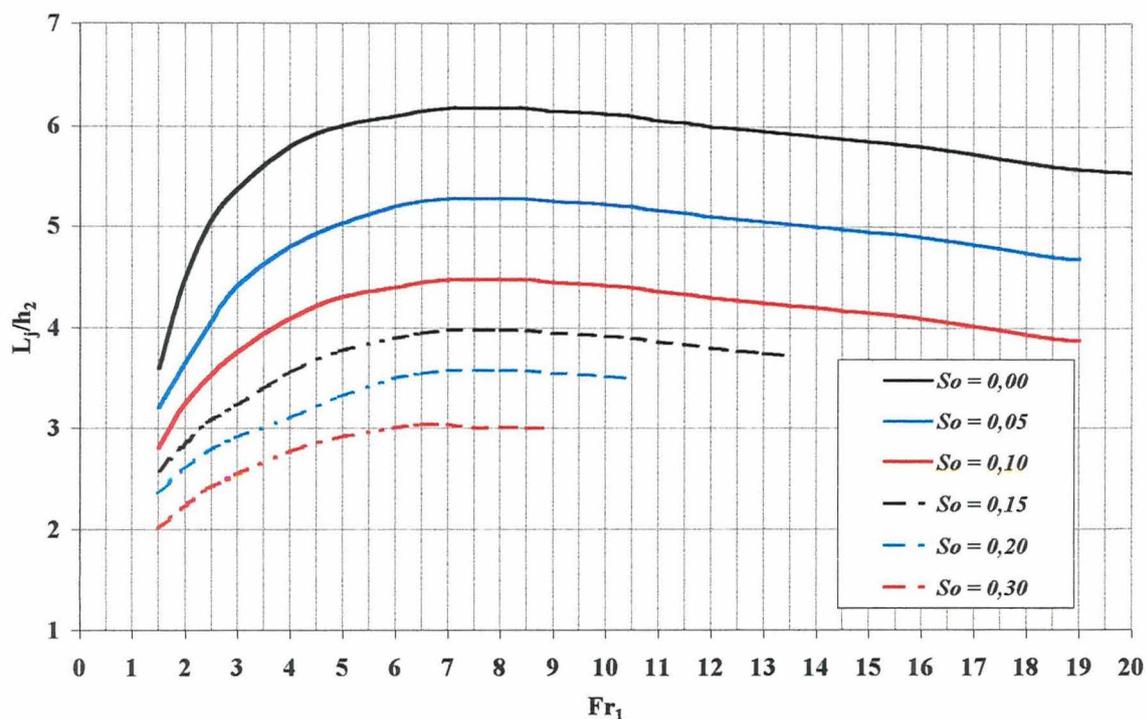


Figura 4.8 - Comprimento do ressalto em canais com fundo inclinado para diferentes números de Froude adaptado de Chow (1959).

Pode-se observar pela Figura 4.8 que o comprimento do ressalto diminui com o aumento da declividade, mantendo o mesmo comportamento em relação ao número de Froude de um ressalto formado em canais horizontais.

4.6 Perfil do Ressalto

Bakhmeteff e Matzke (1946) determinaram o perfil da linha de água do ressalto em um canal com fundo horizontal mostrando que este varia com o número de Froude (Figura 4.9):

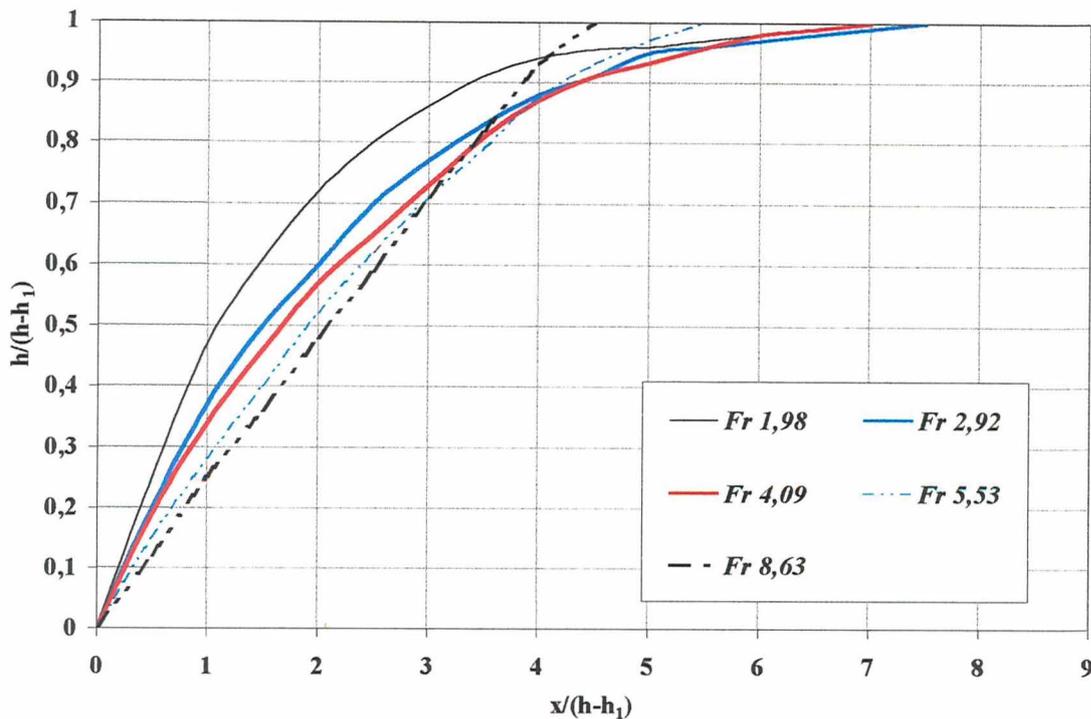


Figura 4.9 - Perfil do Ressalto adaptado de Bakhmeteffe Matzke (1946).

Rajaratnam (1962) apud Hager (1992), apresentou uma relação adimensional para o perfil do ressalto hidráulico dada por:

$$\frac{h-h_1}{h_2} = A_1 \left(\frac{x}{h_2} \right) + A_2 \left(\frac{x}{h_2} \right)^2 \quad (4.19)$$

onde:

h_1 = altura rápida;

h_2 = altura lenta;

h = profundidade do escoamento a uma distância x ;

x = distância horizontal a partir do início do ressalto;

A_1 e A_2 são coeficientes que dependem do número de Froude.

É importante salientar que esse conteúdo revisado sobre perfil da linha de água da superfície livre do ressalto visa relacionar a variação da linha de superfície com o número de Froude, exceto na adimensionalização adotada por Rajaratnam e Subramanya (1968), que apresentaram uma formulação baseada dados experimentais obtidos por outros autores e diferentes números de Froude, indicando uma única relação (Figura 4.10). É importante frisar que essa adimensionalização, também aqui utilizada, consegue agrupar, de forma independente do número de Froude, todos os dados experimentais utilizados.

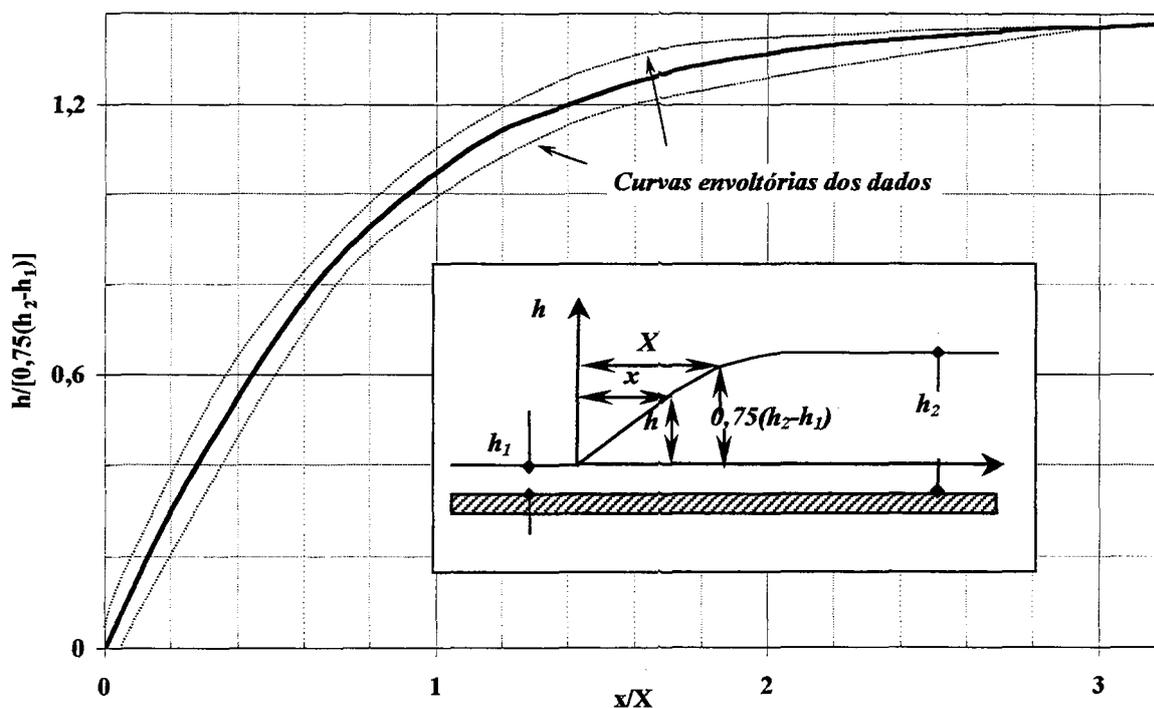


Figura 4.10 - Perfil do Ressalto adaptado de Rajaratnam e Subramanya em 1968.

4.7 Escoamento bifásico e Aeração

O ressalto hidráulico é um fenômeno caracterizado por escoamento bifásico, altamente aerado (Figura 4.11). Observando a formação do ressalto em um canal com paredes de vidro, pode-se notar que o ar é absorvido devido à quebra de ondas na superfície do ressalto. Com isso há formação de bolhas que, puxadas para as regiões do fundo, voltam à superfície devido às forças de empuxo. Esta primeira descrição do escoamento bifásico foi apresentada por Schröder (1963) apud Hager (1992).

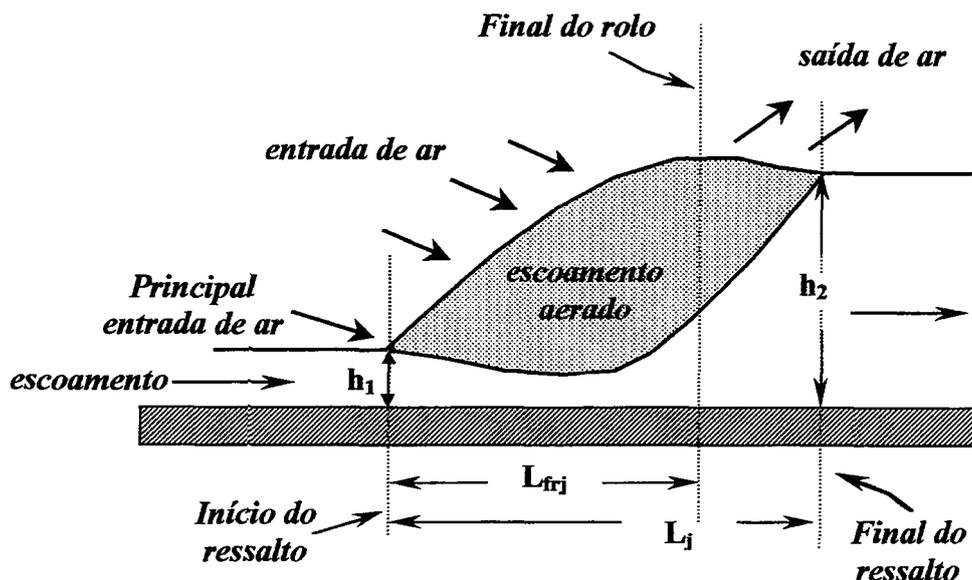


Figura 4.11 - Esquema de entrada e saída de ar em um ressalto.

Rajaratnam (1967) observou que, em uma seção vertical qualquer, a concentração de ar diminui em direção ao fundo do canal e na direção do final do ressalto. Em complemento às suas observações, apresentou uma relação entre a vazão de ar e vazão de água denominando-a como capacidade de bombeamento de ar (β), sendo β_m o seu máximo valor, dado pela expressão 4.20.

$$\beta_m = 0,018 (Fr_1 - 1)^{1,245} \quad (4.20)$$

Marques et al. (1997) mostraram que o ressalto hidráulico apresenta uma zona de bolhas após o rolo, liberadas pelo mesmo, as quais ainda exercem uma influência no campo de pressões nas soleiras de bacias de dissipação.

4.8 Dissipação de Energia

Uma das primeiras expressões de perda de energia no ressalto hidráulico foi elaborada por Bakhmetef e Matzke (1946) que determinaram a eficiência da dissipação de energia ($\Delta H/H_1$), através da diferença entre as energias de montante (H_1) e de jusante (H_2) do ressalto, apresentando:

$$\frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (4.21)$$

onde ΔH é a perda de energia;

H_1 é a energia do escoamento a montante do ressalto;

H_2 é a energia do escoamento a jusante do ressalto.

Peterka (1957) apud Peterka (1974) mostrou que essa eficiência da dissipação de energia no ressalto é diretamente proporcional ao número de Froude, mas, à medida que o número de Froude aumenta, diminui o ganho de eficiência (Figura 4.12).

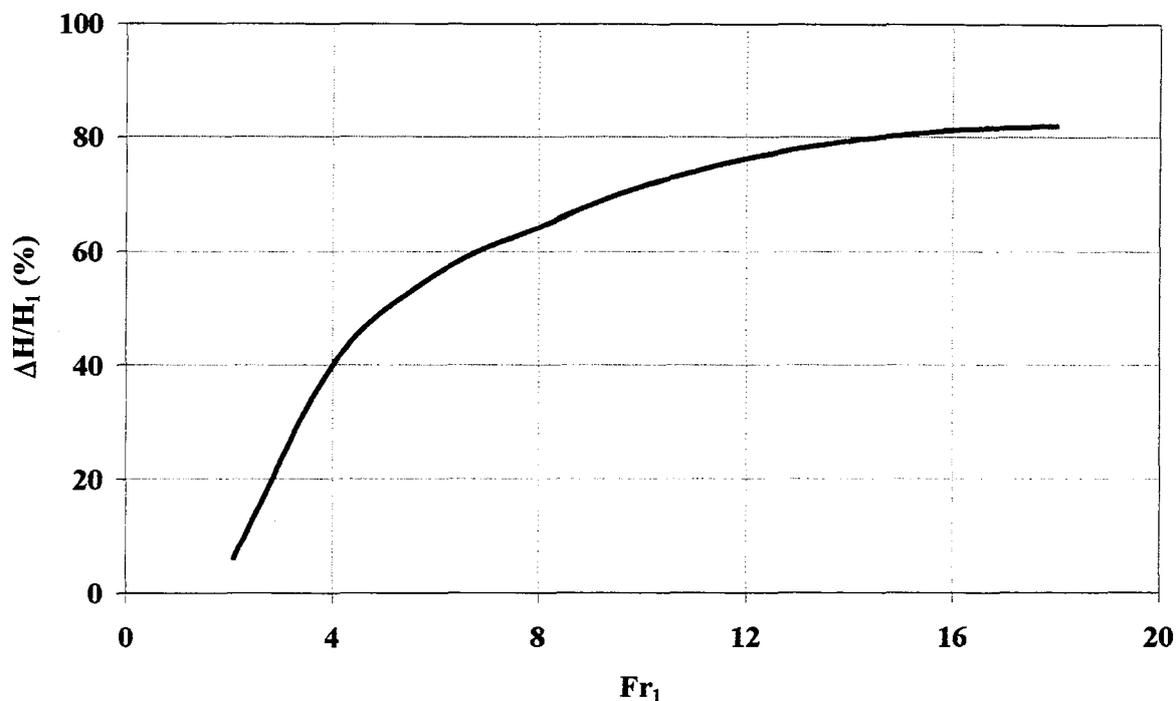


Figura 4.12 - Eficiência do ressalto hidráulico de acordo com o número de Froude adaptado de Peterka (1957).

Rajaratnam (1966) apud Hager (1992) quantifica a perda de energia em ressalto em um canal inclinado em função da declividade (S_0 em m/m) e o número de Froude rápido (Figura 4.13). Normalmente a eficiência da dissipação de energia no ressalto em canais de fundo inclinado diminui com o aumento da declividade, entretanto deve-se observar que ocorre a diminuição da relação entre a energia cinética do escoamento na entrada e na saída.

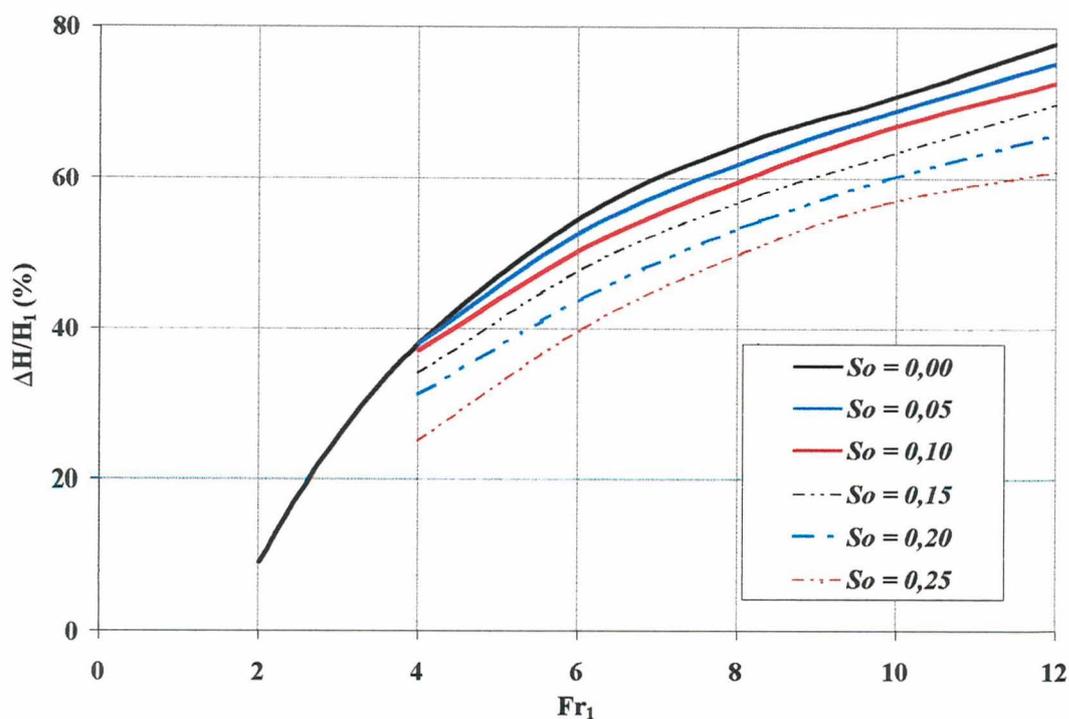


Figura 4.13 - Dissipação de energia do ressalto em um canal inclinado adaptado de Rajaratnam (1966).

Marques et al. (1998), associando a flutuação de pressão junto ao fundo do canal à perda de energia, apresentaram um gráfico de dissipação de energia ao longo do ressalto formado a jusante de um vertedor (Figura 4.14). A análise do processo de dissipação de energia ao longo do ressalto possibilita aos projetistas de estruturas hidráulicas adotarem medidas de segurança contra erosão no leito da bacia de dissipação, bem como optar pela redução das dimensões da estrutura.

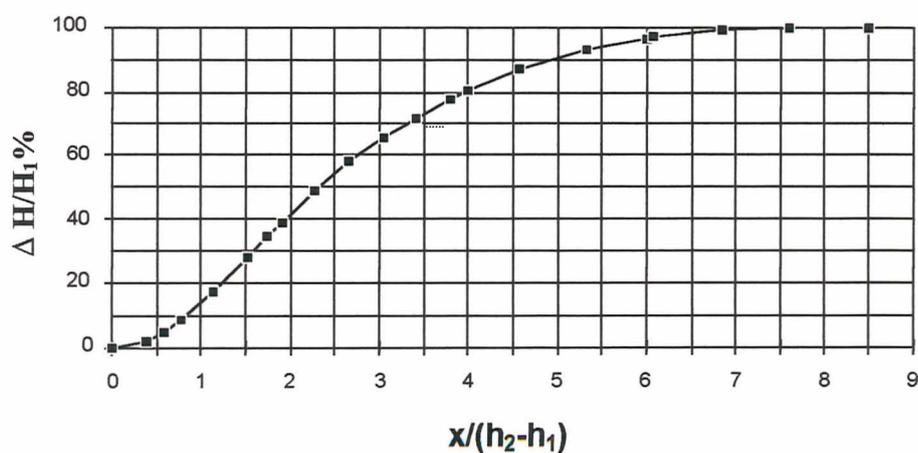


Figura 4.14 - Porcentagem de energia dissipada ao longo do ressalto conforme apresentado em Marques et al. (1998).

4.9 Características Turbulentas no Ressalto

Muitas tentativas de medição das características turbulentas do escoamento de água no interior de um ressalto com anemometria a filme quente fracassaram, principalmente pela presença de um grande número de bolhas de ar no escoamento. Devido a essa dificuldade Rouse *et al.* (1959) simularam o ressalto em um túnel de ar, conseguindo obter as primeiras medidas das características turbulentas. O túnel de ar foi construído com uma forma geométrica que simulava o perfil de linha de água da superfície, originando assim as mesmas macrocaracterísticas do ressalto.

Os autores observaram que a flutuação da velocidade em regime turbulento é pequena no início do ressalto, aumentando até a posição entre 1 e 2 x/h_2 , voltando a diminuir até o final do ressalto. Quanto às tensões de Reynolds, elas são máximas nas regiões de máximo gradiente de velocidade (1 e 2 x/h_2).

Rouse *et al.* (1959) mostraram que a produção de energia turbulenta é maior onde os gradientes de velocidades são máximos (trechos entre 0,5 a 1 x/h_2) para depois diminuir gradualmente até um valor mínimo próximo à posição 5 x/h_2 . Já a dissipação pelas forças viscosas cresce até a posição situada entre 1 a 2 x/h_2 , diminuindo gradualmente até um mínimo próximo à posição 4 x/h_2 . A convecção turbulenta cresce da mesma forma que a dissipação de energia.

As análises feitas por Rouse *et al.* (1959) mostraram que metade da produção da energia turbulenta ocorre na primeira metade do rolo. Devido aos efeitos convectivos do escoamento médio e da difusão turbulenta, a energia não é totalmente dissipada no ponto em que é produzida, mas sim um pouco mais a jusante. Ou seja, existe um espaçamento entre a produção de energia sobre a forma de turbulência e sua dissipação por calor.

Outra análise apresentada por Rouse mostra que a energia cinética turbulenta é notavelmente insignificante em qualquer seção do rolo, mesmo nas regiões de máxima produção, convecção e dissipação.

Em complementação ao trabalho de Rouse *et al.* (1959), Resh e Leutheusser (1972) fizeram algumas observações relacionadas com as características turbulentas, tensões de Reynolds, descrição da zona bifásica e da estrutura dinâmica do ressalto, concluindo:

- as medições das propriedades e intensidades da turbulência, na direção longitudinal, mostram forte dependência com o número de Froude;
- as características de entrada do escoamento influem no tipo, intensidade e zona de influência da turbulência no ressalto. A existência de um escoamento desenvolvido a montante do ressalto conduz para um estado de turbulência na qual a turbulência livre

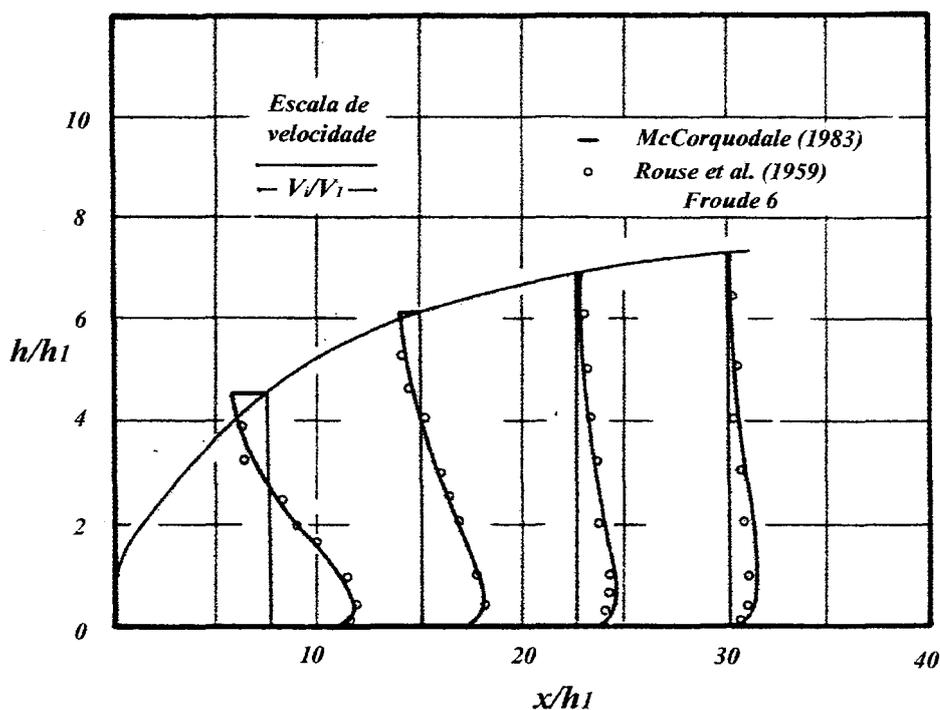
e a turbulência junto às paredes são significativas. Em contraposição, um escoamento não desenvolvido permite desprezar a turbulência junto às paredes. Para escoamentos desenvolvidos, as intensidades da turbulências e o comprimento da região turbulenta apresentaram-se 4 vezes maior do que no caso não desenvolvido;

- o modelo em ar, adotado por Rouse et al. (1959), apresenta como característica de entrada um escoamento não desenvolvido. Devido a este fato os dados do experimento de Rouse não são aplicados a casos onde possa ocorrer um desenvolvimento do escoamento, como é o caso de comportas.

4.10 Perfil de Velocidade

Rouse *et al.* (1959), Schröder (1963), Rajaratnam (1965.b) e McCorquodale e Khalifa (1983) analisaram o perfil de velocidades no ressalto. Devido à grande dificuldade em obter medições de velocidade em escoamentos bifásicos, como no caso do ressalto, esses autores propuseram algumas soluções.

Rouse *et al.* (1959) realizaram medidas de velocidade no interior do ressalto hidráulico em ar com um anemômetro a filme quente. Rajaratnam (1965.b) fez comparações entre um escoamento de um jato de parede e o ressalto hidráulico, com uma sonda de Pitot - Prandtl, apresentando características turbulentas semelhantes envolvendo o desenvolvimento da camada limite, a camada de mistura, e os perfis de velocidade. McCorquodale e Khalifa (1983) utilizaram a simulação numérica mas, suas soluções, desprezam o efeito do escoamento bifásico. A seguir é apresentada uma comparação dos resultados de Rouse (1959) (túnel de ar) e McCorquodale e Khalifa (1983) (Figura 4.15).



Escala V_i/V_1 , velocidade em uma posição vertical qualquer sobre a velocidade na seção rápida.

Figura 4.15 - Perfil de Velocidade apresentado McCorquodale e Khalifa (1983) para $Fr_1 = 6$.

Pode-se observar na Figura 4.15 o perfil médio longitudinal da linha de água da superfície e o perfil de velocidade ao longo do ressalto indicando, na parte superior junto à superfície, uma zona de refluxo e uma zona inferior, junto ao fundo do canal, de velocidades elevadas comparadas à velocidade média do escoamento. Pode-se caracterizar o final do rolo analisando esse perfil de velocidades. Observando junto à superfície pode-se notar entre 20 e 25 x/h_1 um ponto de estagnação que neste trabalho será adotado como indicativo do final do rolo.

4.11 Visualização do Ressalto Hidráulico

A observação puramente visual dos escoamentos na natureza é uma forma grosseira de se visualizar um fenômeno, sem possibilidade de reprodução. Com o surgimento dos primeiros equipamentos fotográficos, a percepção de análise de detalhes do fenômeno aumentou. A partir da invenção de câmeras de vídeo e, mais tarde, do computador, que permitiu a digitalização de imagens, os fenômenos puderam ser visualizados em informações contínuas e com o mesmo detalhamento. Aplicando-se essas técnicas de visualização a um ressalto conseguiu-se analisar até então: as concentrações de ar ao longo de seu comprimento,

os mecanismos de vorticidade inerentes ao fenômeno e as suas características externas e internas. A seguir uma revisão referente a esse assunto.

Resh e Leutheusser (1974) propuseram analisar a razão de vazios (concentração de ar) no ressalto hidráulico usando anemometria de filme quente com sondas cônicas e mostraram que os sinais em um escoamento bifásico são diferentes dos obtidos em um escoamento homogêneo. Os autores determinaram um limite crítico variável no sinal proveniente do anemômetro de filme quente, que dificultava, ainda mais, a análise proposta pelos autores.

Resh e Leutheusser (1974) verificaram que a entrada de ar no ressalto cresce com o aumento de quantidade de movimento linear, e observaram a existência de um padrão na distribuição de bolhas de ar (vazios) no interior do ressalto (Figura 4.16), relacionando-os à condição de entrada do escoamento. Concluíram que ressaltos com escoamento não desenvolvido na entrada possuem inicialmente maior entrada de ar, mas liberam-no mais rápido do que os escoamentos desenvolvidos na entrada. Ou seja, os ressaltos com escoamentos não desenvolvidos a montante são, aparentemente, mais aerados.

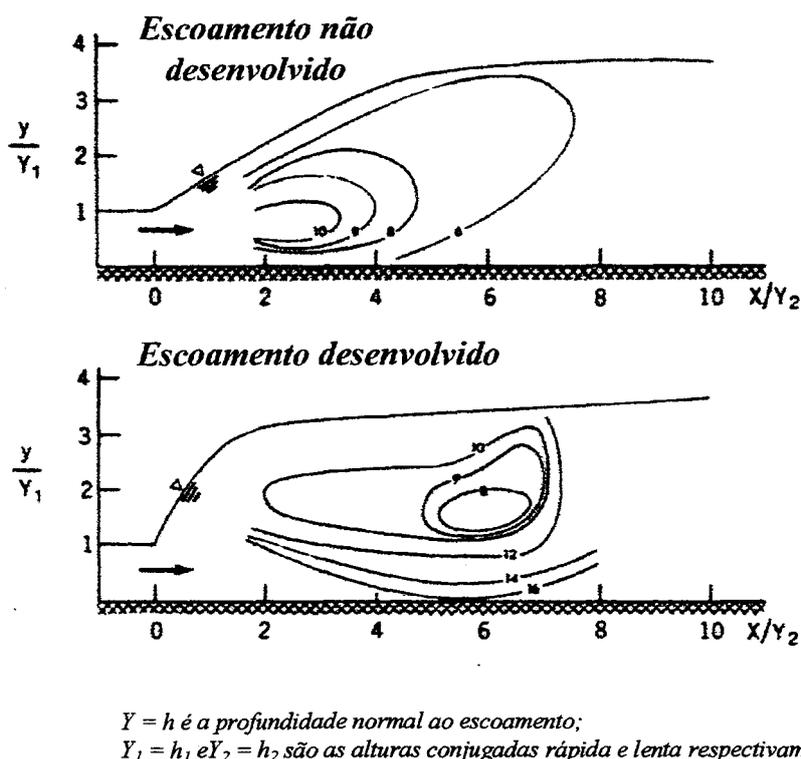


Figura 4.16 – Distribuição do diâmetro médio das bolhas de ar, em milímetros, no ressalto hidráulico para Froude 2,85, conforme publicado e traduzido de Resch e Leutheusser (1974).

É importante ressaltar que, segundo McCorquodale e Khalifa (1983) qualquer referência a respeito das dimensões de bolhas no ressalto e dos tempos de detenção do ar não são regidos pela lei de similaridade de Froude. Isto se deve a diversos motivos, como por

exemplo, a velocidade média de ascensão das bolhas no interior do ressalto é muito inferior àquela que se verifica em um regime hidrostático. Esta redução é devida à colisão, coalescência e diferentes velocidades dentro do ressalto, causando maior liberação de ar no trecho onde as dimensões das bolhas aumentam.

Hoyt e Sellin (1989) propuseram estudar o ressalto como uma camada de mistura com estruturas coerentes e relação entre a densidade do ar e água igual a 800. Sua comparação baseia-se nos estudos feitos por Brown e Rishko (1971) que apresentam fotografias “*shadowgraph*” de uma camada de mistura entre dois gases com razão entre velocidades e densidades igual a 8. A intenção dos autores é induzir o leitor a pensar que dois gases, um mais denso e rápido escoando em uma direção e outro menos denso e lento em sentido oposto, são capazes de reproduzir a semelhança física com o processo de dissipação por ressalto. Esta visão tem uma base teórica bem fundamentada e vai servir para a descrição do fenômeno proposta mais adiante.

Hoyt e Sellin (1989) estudaram o ressalto produzido a jusante de uma comporta em um canal de vidro. A iluminação proposta é difusiva e posicionada acima do ressalto. Foram tiradas fotografias com o uso de um filme tipo Ilford XP1 400 e velocidade aparente de 3000 ISO, f 5,6 (relação entre distância focal e a abertura do diafragma) e 1/1000 s de velocidade de obturador. Para facilitar a visualização foram colocados, no reservatório de alimentação, soluções de concentrações conhecidas de um polímero tipo Dow AP-302.

Adicionando o polímero, os autores foram capazes de diminuir a entrada de ar e conseqüentemente, o efeito da difusividade da luz, facilitando a visualização das bolhas de ar. Os números de Froude selecionados para fotografias foram 2,5; 3 e 3,5. Nesta faixa ensaiada obteriam menores quantidades de ar dentro do ressalto facilitando a visualização do fenômeno.

Os resultados apresentaram uma semelhança entre as fotografias obtidas do ressalto e as “*shadowgraph*” da camada de mistura dos gases. Os autores sugerem que o ressalto hidráulico é um exemplo extremo de um escoamento de camada de mistura com o fluido mais pesado e rápido em baixo (água) e o mais leve e lento acima (ar). Em função disso os autores buscaram, através de formulações de camada de mistura, estimar a entrada de ar no ressalto hidráulico. Comparando com Resh et al. (1974), chegaram à conclusão de que o volume de ar no rolo para número de Froude 2,85 é, aproximadamente, 3% do volume de água. Com isso o modelo apresentado parece satisfatório e serve como estimativa na quantificação de ar no interior do ressalto hidráulico.

Long et al. (1991) baseados nos conceitos introduzidos por Rajaratnam (1967) do ressalto como jato de parede, e os estudos de desenvolvimento de camada de mistura proposta por Winant e Browand (1974), aprofundaram-se no estudo de visualização do ressalto utilizando um sistema de câmera de alta velocidade (2000 quadros por segundo). O ressalto estudado era formado a jusante de comporta em um canal retangular de 47 cm de largura por 52 cm de altura numa faixa de número de Froude de 4 a 9.

Antes de dar continuidade à revisão do trabalho de Long et al. (1991), é importante salientar algumas considerações que Winant e Browand (1974) fizeram referentes ao processo de acoplamento de vórtices em uma camada de mistura turbulenta de número de Reynolds moderado (2400 a 74000):

- o início da instabilidade se dá naturalmente devido a pequenas ondas de perturbações (equação de instabilidade de Orr-Sommerfeld e Rayleigh para meios não viscosos), ou de forma forçada, como é o caso do ressalto (condições de jusante);
- o acoplamento está associado à geração de frequências sub-harmônicas características ao crescimento não linear dos vórtices;
- o acoplamento entre vórtices vizinhos é contínuo até a espessura da camada de mistura atingir a ordem de altura do canal, quando as fronteiras sólidas do canal inibem o processo;
- os vórtices de grande escala estendem-se em toda largura do canal não apresentando variação apreciável nesta direção;
- a camada de mistura cresce a partir da combinação de vórtices de grande escala;
- os vórtices deformam-se a medida que se acoplam, tornando-se alongados, em forma elíptica, na direção do escoamento, em uma razão entre os eixos da elipse da ordem de 2.

Long et al. (1991) foram capazes, utilizando baixa velocidades de captura de imagens, de caracterizar macro estruturas do ressalto e, analisando as imagens visualmente, indicar correntes de direção de fluxo nos turbilhões, zonas de bolhas de ar, como também, características geométricas dos turbilhões (Figura 4.17). Chegaram a que as dimensões verticais dos turbilhões aproximam-se da altura no perfil médio longitudinal da linha da superfície de água do ressalto (Figura 4.18).

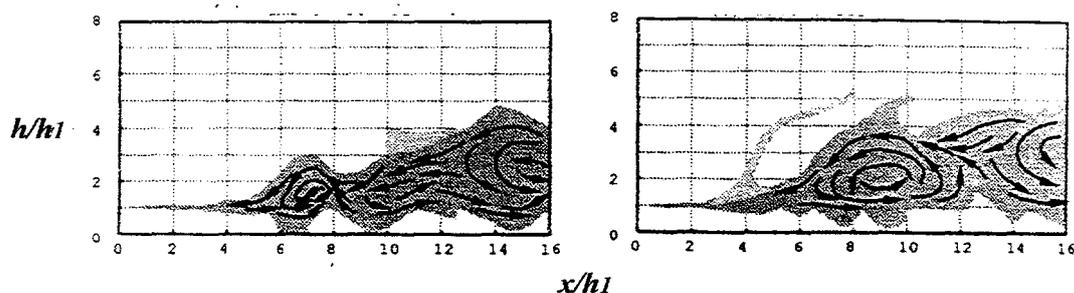


Figura 4.17 – Correntes e zonas de bolhas ao longo do ressalto para Froude 6 conforme apresentado por Long et al. (1991).

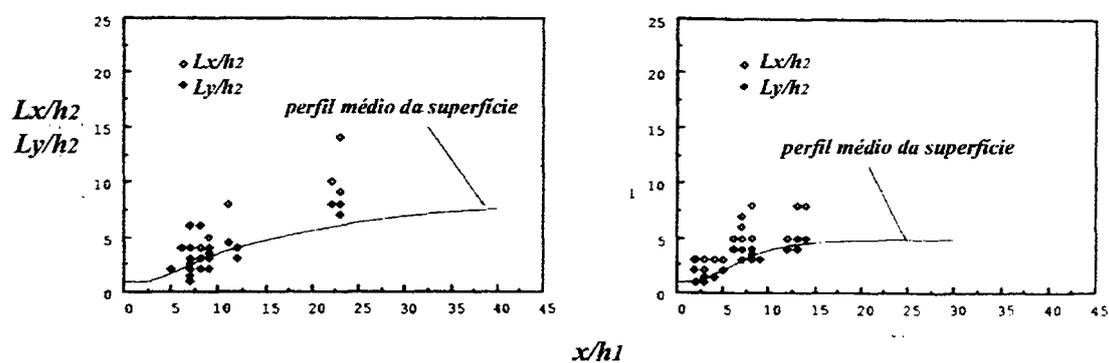


Figura 4.18 – Escalas dos turbilhões ao longo do ressalto. A esquerda é para Froude 6 e da direita para número de Froude 4 (Long et al., 1991).

O comprimento, na direção do escoamento, dos turbilhões varia entre 1,5 e 2,0 vezes do comprimento vertical, dependendo de sua posição longitudinal (Figura 4.19).

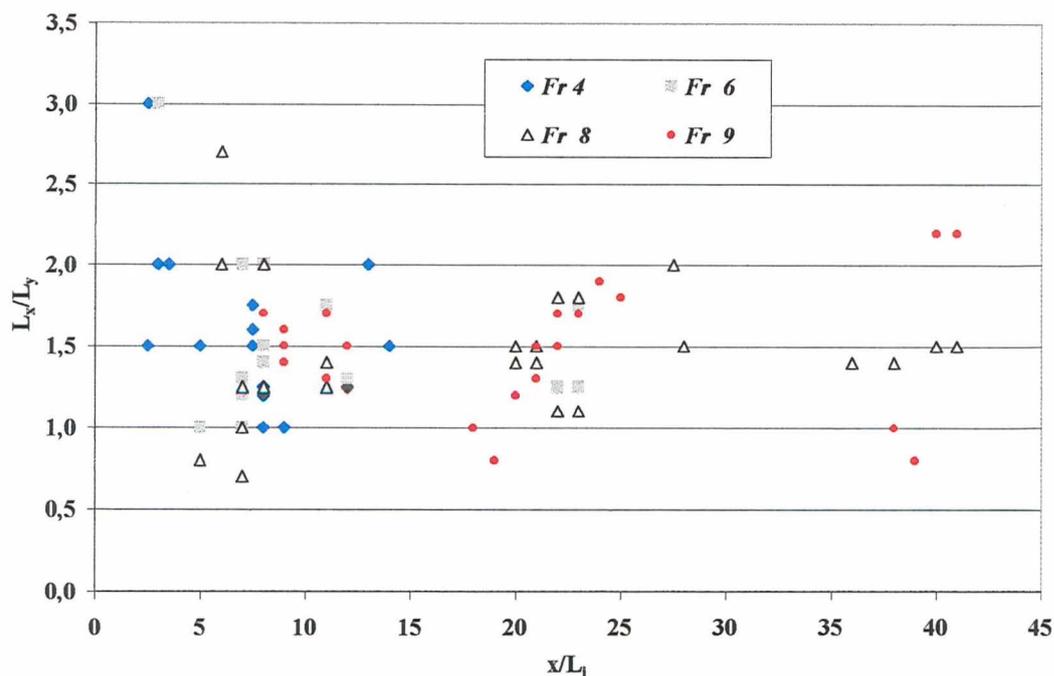


Figura 4.19 – Variação das dimensões dos turbilhões no ressalto de acordo com sua posição.

Adaptado de Long et al. (1991).

Entretanto utilizando altas velocidades de captura de imagens os mesmos autores, conseguiram identificar um padrão de eventos no desenvolvimento, interação dos turbilhões e variações do início do ressalto. Long et al. (1991) afirmaram que quando o ressalto estira-se, existem, dentro do ressalto, o maior número de turbilhões, que crescem do início ao final.

Com respeito ao crescimento, eles afirmam que dois turbilhões vizinhos interagem, acoplando e crescendo em direção a jusante até o maior turbilhão que sempre se localiza no final do rolo. Este acoplamento, segundo os autores, é causado pelo refluxo do escoamento na parte superior do ressalto, repondo material para formação de outro turbilhão. Quando isto ocorre o início do ressalto está mais a jusante, levando os autores a concluir que o acoplamento entre turbilhões está estreitamente ligado à grande flutuação na posição do início do ressalto (Figura 4.21). Long et al. (1991) apresentaram, também, uma análise das variações do início do ressalto (Figura 4.20) que permitiram uma futura comparação com os resultados obtidos neste trabalho.

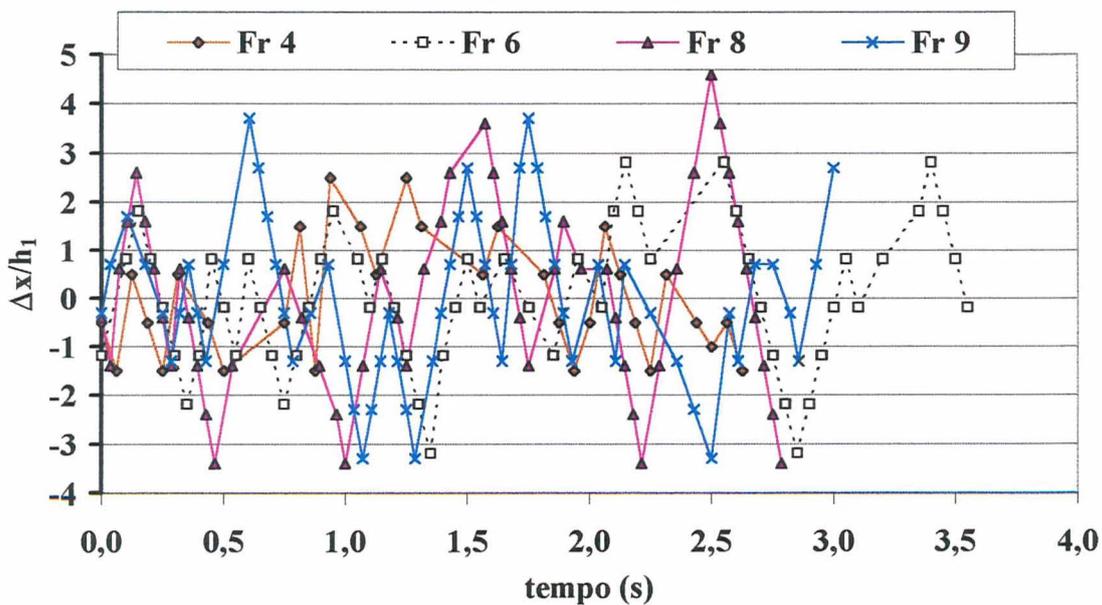


Figura 4.20 – Variações do início do ressalto apresentado por Long et al. (1991).

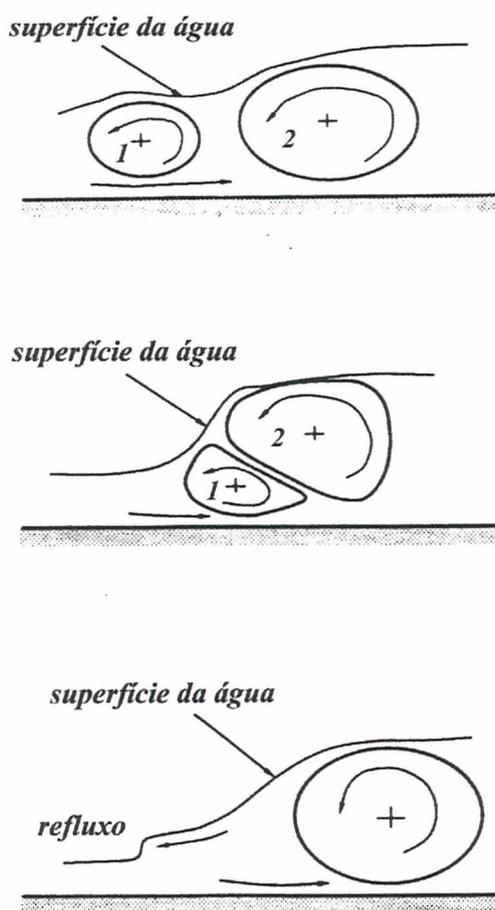


Figura 4.21 – Esquema do acoplamento de turbilhões vizinhos proposto por Long et al. (1991).

Mossa e Tolve (1998) determinaram a concentração de ar em um ressalto livre a jusante de comporta. Para tal, efetuaram digitalização de imagens geradas por um sistema de câmera de ½ polegada denominado “charge-coupled device” com resolução de 200.000 “pixels”. A câmera foi disposta de forma a poder capturar a parte lateral do ressalto de uma vez só, sendo ligada a um monitor. A iluminação foi disposta de forma a obterem a melhor intensidade sem reflexos e sombras. O sistema de aquisição de imagem possui um vídeo ao mesmo tempo reproduzidor e capturador de quadros.

Os ressaltos ensaiados foram na faixa de números de Froude de 6 a 8 e números de Reynolds 57000 a 58000. Mossa e Tolve (1998), analisando a dinâmica do rolo, determinaram a região de maior concentração de ar do ressalto situada entre 20 a 30 % do comprimento do ressalto. Através das imagens obtidas, concluíram que essa região sofre contração e expansão, podendo dividir-se em duas. Isto ocorre quando a superfície do ressalto está mais inclinada e se dá a dissipação do maior turbilhão no final do rolo.

Hornung et al. (1995) visualizaram o ressalto hidráulico sob o ponto de vista da geração e análise da vorticidade. Para tal utilizaram um *DPIV (Digital Particle Imaging Velocimeter)*, onde traçadores auxiliaram na determinação dos campos de velocidades do escoamento. Estes traçadores eram esferas prateadas de vidro, de diâmetro de 10 μ m, massa específica de 1100 kg.m⁻³ e velocidade de sedimentação igual a 0,1mm.min⁻¹. A tarefa de seleção de um traçador eficiente é bastante árdua exigindo experiência do pesquisador. Devido à baixa velocidade de sedimentação deste traçador, os autores foram capazes de gerar bons resultados na obtenção dos campos de velocidades, sem grande interferência no escoamento.

O método de visualização utilizado apresentou uma única limitação decorrente das características do fenômeno. Por se tratar de um escoamento bifásico, os autores tiveram dificuldades em determinar os campos de velocidades na parte superior do ressalto junto à linha de água da superfície. Os ressaltos ensaiados foram na faixa de número de Froude entre 2 e 6.

Hornung et al. (1995) adotaram, com o intuito de diminuir a entrada de ar no escoamento, ensaiar um ressalto não estável em uma única posição do canal. Uma comporta separando duas porções do canal, propiciava a elevação do nível de água de um lado da comporta, que abrindo rapidamente, produzia um ressalto que movimentava-se em direção a seção de ensaio onde o *DPIV* estava localizado. Os traçadores eram espalhados uniformemente na seção de ensaio, antes da comporta liberar o ressalto. O LASER era pulsado durante 1,5 ms em intervalos de 5 ms. A frequência de aquisição de imagens usada

para determinação do campo de velocidade era de 15 Hz. O tempo de aquisição era 10 s gerando 150 imagens para cada ensaio.

Antes de apresentar os resultados desse estudo, Hornung et al. (1995) frisaram diversos pontos referentes à geração da vorticidade no ressalto, apresentados por Yeh (1991) apud Hornung et al. (1995), atribuindo-a a três fatores:

1. a influência da tensão viscosa na interface dos dois fluidos;
2. a resultante entre os torques devidos à diferença entre a componente horizontal do empuxo, proveniente da pressão atmosférica, na superfície da linha de água do ressalto, e do empuxo do escoamento a jusante do rolo; e
3. a variação de densidade ao longo do ressalto sendo esse último o fator dominante.

Esses pontos ajudam a explicar a geração de vorticidade no interior do ressalto e aplicam-se, também, à comparação feita por Hoyt e Sellin (1989), entre o ressalto e uma camada de mistura turbulenta.

Hornung et al. (1995) concluíram que:

- A vorticidade é gerada no início do ressalto produzindo uma camada de mistura que penetra no escoamento, caracterizando-o como tipicamente rotacional;
- A técnica aplicada não permitiu a determinação da vorticidade junto a superfície devido à grande entrada de bolhas de ar no escoamento; e
- A vorticidade gerada pela camada limite não influencia a camada de mistura.

Os autores sugeriram que o ressalto que se propaga ao longo do canal é uma configuração mais interessante para o estudo da geração de vorticidade do que o ressalto estável (em posição fixa), produzido em canais de laboratório, sendo esse último, bastante difícil de reproduzir sem uma espessa camada limite turbulenta.

Hornung et al. (1995) analisando os campos de velocidades obtidos, identificaram um outro mecanismo de geração de vorticidade no interior do ressalto. Observaram que à medida que a razão de alturas conjugadas aumentava, começavam a formar-se, na parte superior do ressalto, pequenas ondas que se propagavam contra o escoamento principal. Estas ondas ao quebrarem, reintegravam-se ao escoamento propiciando a entrada de ar, auxiliando também no processo de geração de vorticidade no interior do ressalto.

Pode-se notar que quase todas as teorias recaem na explicação da geração e desenvolvimento da vorticidade no ressalto hidráulico. É claro que todas as características

turbulentas derivam dessa “forte camada de mistura”, onde dois fluidos interagem provocando dissipação parcial de energia cinética para potencial.

4.12 Efeito de Escala em Estudo de Modelo Reduzido

Embora esta pesquisa não seja referente a algum modelo reduzido específico, este assunto será aqui abordado devido ao ressalto hidráulico em estruturas ser, normalmente, modelado em laboratório.

A partir da década de 70, a lei de semelhança de Froude foi consagrada para caracterização do ressalto hidráulico (Pinheiro, 1995). Esse autor afirma que ao escolher a semelhança de Froude para efetuar um estudo em modelo, não é possível respeitar com rigor a semelhança entre frequências do fenômeno, devido a limitações na reprodução da viscosidade. No entanto, como os fenômenos de macroturbulência associados ao ressalto hidráulico apresentam frequências baixas (menores do que 20 Hz) (Lopardo et al., 1984 e Lopardo 1987 apud Pinheiro, 1995), as funções de densidade espectral (f) obtidas no modelo podem ser transferidas ao protótipo segundo uma relação de escalas $L_{\text{modelo}}/L_{\text{protótipo}}$.

$$f_{\text{protótipo}} = f_{\text{modelo}} \sqrt{\frac{L_{\text{modelo}}}{L_{\text{protótipo}}}} \quad (4.22)$$

Por ser um escoamento bifásico, a modelação de características como as dimensões das bolhas e a aeração são de extrema importância para o entendimento do processo de dissipação de energia. McCorquodale e Khalifa (1983) afirmaram que, para tal modelação, a lei de semelhança de Froude se mostrará ineficiente. Segundo estes autores, o efeito de viscosidade, a entrada de ar e o desenvolvimento da camada limite na entrada do ressalto são diferentes entre o protótipo e o modelo, não podendo ser caracterizados somente pelo número de Froude.

Hager e Bremen (1989) fizeram uma abordagem interessante do problema. Através de um modelo teórico que considera o efeito da tensão de cisalhamento na relação de altura conjugada, os autores propuseram faixas nas quais o efeito de escala pode ser desconsiderado. Para confirmar os resultados foram também realizados experimentos em canais com diferentes dimensões, para uma gama de números de Froude $2 < Fr_1 < 12$, de seção retangular e declividade nula chegando aos seguintes resultados:

$$\frac{h_2}{h_1} = \mathfrak{F} \left(Fr_1, Re_1, \frac{h_1}{b} \right) \quad (4.23)$$

onde h_1 é a altura conjugada rápida;

b a largura do canal;

Fr_1 e Re_1 são respectivamente o número de Froude rápido e o número de Reynolds na seção da altura conjugada rápida.

$$w = \frac{h_1}{b} \quad (4.24)$$

$$w_L = \frac{1}{65} \left[\frac{1 - 14(\log Re_1)^{-2,5} \exp\left(\frac{Fr_1}{8}\right)}{(\log Re_1)^{-3} \exp\left(\frac{Fr_1}{7}\right) - 0,7(\log Re_1)^{-5,5} \exp\left(\frac{Fr_1}{3,73}\right)} \right] \quad (4.25)$$

onde a condição w (Equação 4.24) $< w_L$ (Equação 4.25) é necessária para que o ressalto hidráulico não sofra influência de efeitos de escala.

Hager e Bremen (1989) também frisaram que, para desvios maiores do que 5% encontrados entre a fórmula de Bélanger e a formulação de altura conjugada apresentada anteriormente, deve-se levar em consideração o efeito de viscosidade na determinação das alturas conjugadas.

5 Instalações Experimentais

A instalação experimental empregada nesta pesquisa é constituída por canal existente no laboratório de Ensino do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – UFRGS. A alimentação do canal é feita por um reservatório superior (5,40 m x 2,60 m x 0,80 m) de nível de água constante. O controle de vazão de entrada é feita por um vertedor de parede delgada, retangular sem contração e capacidade máxima de 100 l/s. O reservatório superior está conectado ao vertedor, com um desnível de 3,20 m, por uma tubulação de 200 mm de diâmetro interno. Essa configuração do sistema de alimentação possibilita uma vazão máxima de 70 l/s. A seção transversal do canal é retangular com 0,40 m de largura por 0,50 m de altura e sua declividade longitudinal de fundo é de 0,2%. O comprimento total é de 35,35 m e, ao longo de sua extensão, existem tomadas de níveis de água. Junto a essas tomadas, pontas linimétricas, previamente calibradas (*Anexo A – Métodos de Aferição dos Instrumentos de Medição*), realizam as medições de nível de água ao longo de todo o escoamento. O revestimento interno do canal é de cimento alisado (coeficiente de Manning aproximado de $0,01 \text{ s.m}^{-1/3}$). No extremo de jusante do canal uma comporta basculante controla o nível de água ao longo do mesmo e auxilia também no posicionamento do ressalto na seção de ensaio.

Foi construída, para realização deste trabalho, uma seção longitudinal de 2,05 m de comprimento com as mesmas características geométricas do canal, exceto pela substituição das paredes de alvenaria por janelas de vidro que, permitiram, a visualização do ressalto em duas vistas longitudinais (lateral e superior). Acima dessa, foi adaptada uma ponta linimétrica móvel de forma a obter medições de nível de água ao longo do sua extensão. A comporta que produzia o ressalto foi instalada imediatamente a montante dessa seção, com o intuito de facilitar sua operação durante os ensaios. Existe ainda a possibilidade de analisar também o campo de pressões junto ao fundo do canal (orifícios indicados na Figura 5.1). A Figura 5.1 apresenta um esquema geral e detalhado do conjunto citado.

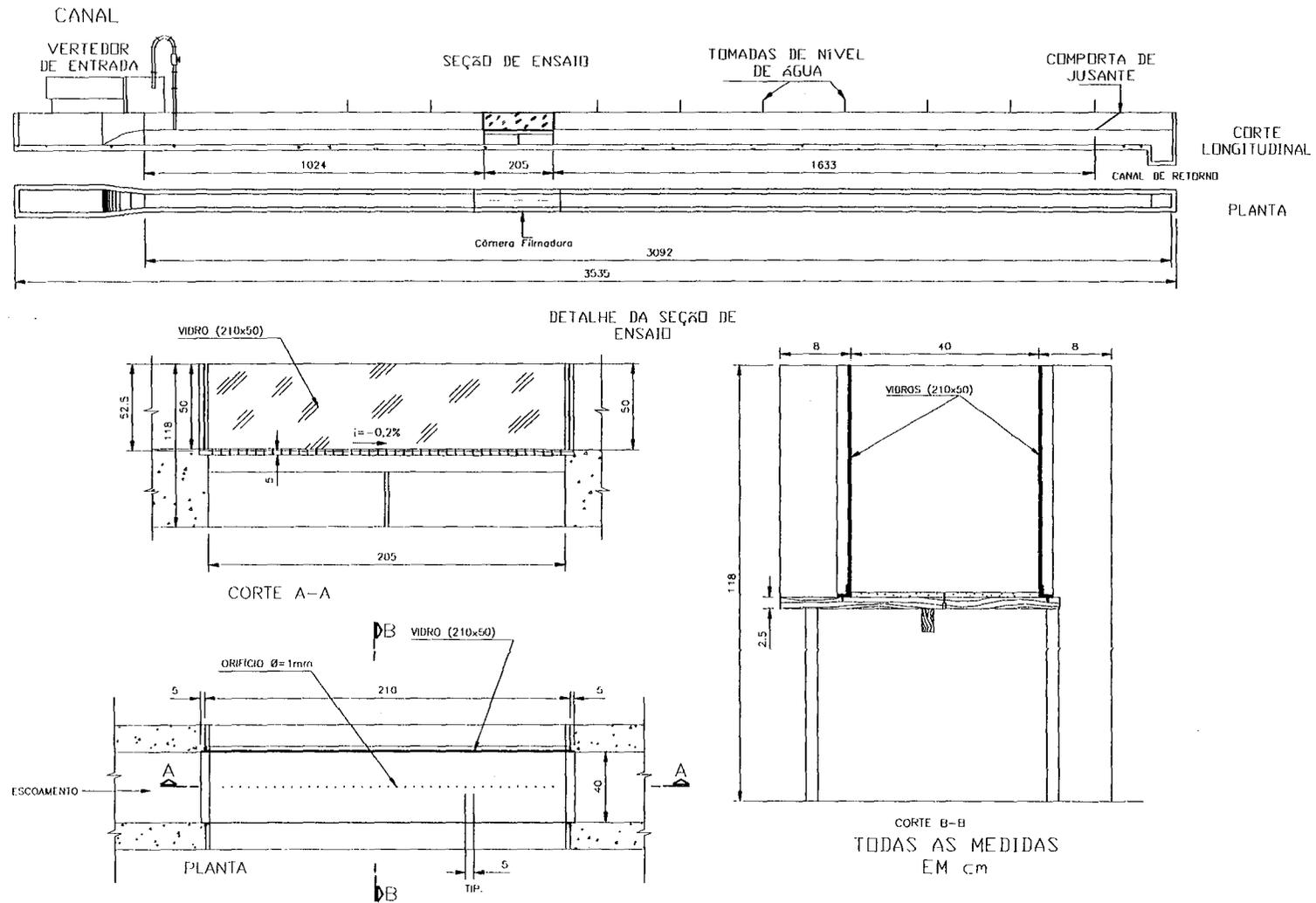


Figura 5.1 – Representação da Instalação Experimental.

6 Caracterização do Problema

Uma importante ferramenta de análise de um fenômeno na Hidráulica Experimental é a Análise Dimensional. Assim apresenta-se, em anexo (*Anexo B – Análise Dimensional*), uma seção especialmente dedicada a este assunto. Buscou-se através do conhecimento prévio das variáveis envolvidas no fenômeno, montar grupos adimensionais, específicos neste problema, que possibilitariam uma organização eficiente dos parâmetros hidráulicos e geométricos, como também, uma análise dos resultados aqui encontrados. É importante frisar que foi adotada uma análise bidimensional do ressalto determinando-se, então, com o objetivo de estudar seu escoamento macroturbulento, os seguintes grupos adimensionais:

$$\frac{\Delta H}{(h_2 - h_1)} = \mathfrak{F} \left(Fr_1, Re_1, \frac{x}{(h_2 - h_1)}, \frac{L}{(h_2 - h_1)}, \frac{\Delta L}{L}, \frac{b}{h_1}, \frac{\delta_{(x=0)}}{h_1}, \frac{(h_p - h_1)}{(h_2 - h_1)}, \frac{(h_r - h_1)}{(h_2 - h_1)}, \frac{(\Delta h_p - h_1)}{(h_2 - h_1)}, \frac{(\Delta h_r - h_1)}{(h_2 - h_1)} \right) \quad (6.1)$$

onde:

ΔH é a dissipação de energia ao longo do ressalto;

h_1 é a altura conjugada rápida;

h_2 é a altura conjugada lenta;

Fr_1 é o número adimensional de Froude;

Re_1 é o número adimensional de Reynolds;

x é a coordenada longitudinal referente ao início do ressalto;

L é um comprimento característico da ressalto;

ΔL é a variação de um comprimento característico do ressalto;

b é a largura do canal;

$\delta_{(x=0)}$ é a espessura da camada limite no início do ressalto;

h_p é a altura do perfil longitudinal do ressalto no ponto $x = X$;

h_r é a altura do perfil longitudinal inferior do rolo no ponto $x = X$;

Δh_p é a variação da altura do perfil longitudinal do ressalto;

Δh_r é a variação da altura do perfil longitudinal inferior do rolo.

Visando uma caracterização mais completa do fenômeno propôs-se, também, aqui, uma análise do escoamento supercrítico a montante do ressalto. Diversos autores como Rajaratnam (1965.b), Resh e Leutheusser (1974), Ohtsu e Yasuda (1994) e outros, citaram a importância da formação da camada limite nesse escoamento, relacionando-o com o estudo do ressalto hidráulico. O grau de desenvolvimento desta pode influenciar no tamanho, na localização e nas características internas do ressalto, como também na determinação de forças de arrasto sobre as lajes de bacias de dissipação.

O ressalto hidráulico é o fenômeno que ocorre na transição entre um escoamento supercrítico e um subcrítico em uma curta distância de um canal, onde ocorre uma rápida diminuição da velocidade média do escoamento, em consequência da transformação da energia cinética em potencial, com aeração do escoamento líquido. É por este motivo que será abordada, neste item, a metodologia para determinação do número adimensional de Froude na seção da altura conjugada rápida que, a partir dos anos 70 tornou-se um dos instrumentos mais importantes para caracterização do ressalto. Este é definido pela relação entre as forças inerciais e gravitacionais, sendo comumente denominado como número de Froude rápido (Fr_1). Neste trabalho, devido às condições disponíveis no laboratório, foram ensaiados os seguintes números de Froude rápidos: 2,9; 3,8 e 7,0.

6.1 Camada limite a montante do ressalto hidráulico

Dentre as situações em que o ressalto hidráulico em canal é formado será, aqui, analisado o ressalto a jusante de comportas.

Em escoamentos supercríticos a jusante de comportas, a camada limite se desenvolve a partir da *vena contracta*, estendendo-se sobre todo o escoamento mais a jusante, sendo dependente de parâmetros como o número de Reynolds, número de Froude e tensão de cisalhamento sobre as paredes do canal. A localização do ressalto depende das condições do escoamento a montante e da declividade do canal.

O ressalto hidráulico, neste estudo, é caracterizado pela altura conjugada rápida a jusante da *vena contracta*. Através da manipulação da comporta a jusante do ressalto, buscou-se colocá-lo o mais próximo possível da *vena contracta* possibilitando, assim, uma análise sem grandes influências da estrutura que o precede.

A distância entre a *vena contracta* e o ponto de afloramento da camada limite tem sido, ainda hoje, ponto de diversos estudos. Ohtsu e Yasuda (1994) propuseram uma

formulação teórica para o perfil da linha de água em regime supercrítico a montante do ressalto e desenvolvimento da camada limite. A formulação proposta por estes autores é válida para canais de fundo horizontal, diferentemente deste estudo. Neste caso, a camada limite se desenvolve mais lentamente, de modo que, a formulação utilizada possibilitará apenas uma caracterização da camada limite a montante do ressalto.

6.1.1 Análise do escoamento a jusante de comporta para canal horizontal e seção retangular.

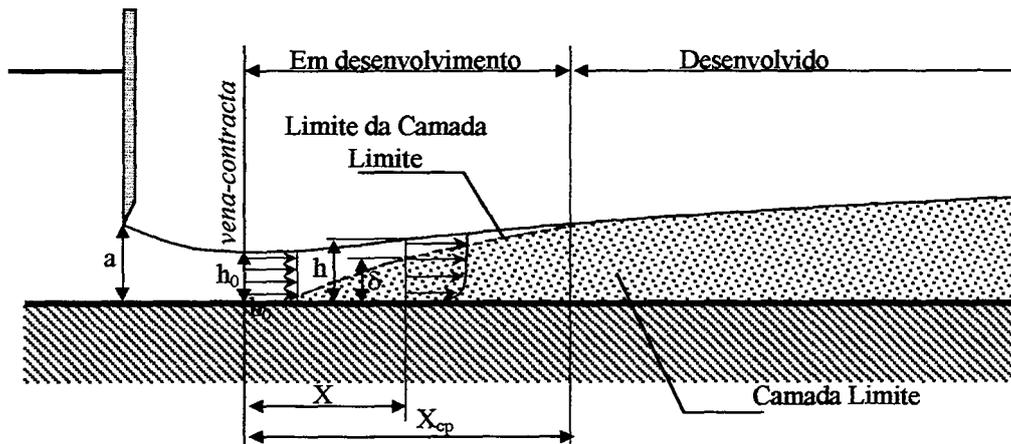


Figura 6.1 – Esquema para análise teórica do desenvolvimento da camada limite a montante do ressalto hidráulico.

Em um escoamento fora da camada limite, a equação de Bernoulli pode ser aplicada a uma linha de corrente entre $x = 0$ e $x = X$ (Figura 6.1), obtendo-se:

$$\frac{U_0^2}{2g} + h_0 = \frac{U^2}{2g} + h \quad (6.2)$$

onde :

U_0 é a velocidade na *vena contracta*;

U é a velocidade fora da camada limite;

h_0 é a profundidade do escoamento na *vena contracta*;

h é a profundidade do escoamento supercrítico em $x = X$;

X é uma posição longitudinal qualquer referente ao início do ressalto.

Adimensionalizando (6.2) temos:

$$\frac{h}{h_0} = \frac{1}{2} Fr_0^2 \left(1 - \frac{1}{J^2} \right) + 1 \quad (6.3)$$

onde :

Fr_0 é o número de Froude na *vena contracta*;

J é a relação entre U_0 e U .

Podemos representar a equação da continuidade como:

$$U_0 h_0 = U(h - \delta_*) \quad (6.4)$$

onde :

δ_* é a espessura de deslocamento $= \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\bar{u}}{U} \right) dh$;

δ é a espessura da camada limite;

\bar{u} é a velocidade média local no interior da camada limite para $h = H$;

h é a coordenada vertical ao fundo do canal;

H é uma profundidade ao fundo do canal de um ponto qualquer no interior da camada limite.

É usual supor que o perfil de velocidade no interior da camada limite segue uma lei de potência da ordem de 1/7:

$$\frac{\bar{u}}{U} = \left(\frac{h}{\delta} \right)^{1/7} \quad (6.5)$$

δ_* pode ser escrito como:

$$\delta_* = \frac{\delta}{8} \quad (6.6)$$

Combinando (6.3), (6.4) e (6.6) temos:

$$\frac{\delta}{h_0} = 8 \left[Fr_0^2 \left(1 - \frac{1}{J^2} \right) \frac{1}{2} + 1 - J \right] \quad (6.7)$$

Para camada limite em canais, pode-se representar a equação integral fundamental da conservação da quantidade de movimento para camada limites bidimensionais e fluidos incompressíveis:

$$\frac{d\theta}{dx} + \frac{2\theta + \delta_*}{U} \frac{dU}{dx} = \frac{C_f}{2} \quad (6.8)$$

onde:

$$\theta \text{ é o espessura de quantidade de movimento} = \int_0^{\delta} \left[\left(1 - \frac{\bar{u}}{U}\right) \left(\frac{\bar{u}}{U}\right) dh \right];$$

$$C_f \text{ é o coeficiente local de cisalhamento} = \frac{\tau_0}{\left(\frac{\rho U^2}{2}\right)} \text{ (Schlichting, 1979);}$$

τ_0 é a tensão de cisalhamento no fundo do canal;

Usando (6.6), θ pode ser escrito como:

$$\theta = \frac{7\delta}{72} \quad (6.9)$$

Substituindo (6.6), (6.7) e (6.9) em (6.8) tem-se:

$$dx = \frac{2}{C_f} \left[-\frac{37U}{18g} + \frac{23}{9} \left(h_0 + \frac{U_0^2}{2g} \right) \frac{1}{U} - \frac{16h_0U_0}{9U^2} \right] dU \quad (6.10)$$

O coeficiente C_f pode ser expresso para uma camada limite turbulenta sobre uma placa plana lisa com gradiente de pressão nulo como (Schlichting, 1979):

$$C_f = 0.0592 \left(\frac{Ux}{\nu} \right)^{-1/5}; \quad 3 \times 10^5 \leq \frac{Ux}{\nu} \leq 1 \times 10^7 \quad (6.11)$$

Substituindo (6.11) em (6.10) e integrando de $x = 0$ ($U = U_0$) a $x = X$ ($U = U$) segue-se:

$$\frac{x}{h_0} = 194 \text{Re}^{1/4} \left[\frac{37}{99} Fr_0^2 \left(1 - J^{-11/5} \right) + \frac{23}{9} \left(2 + Fr_0^2 \right) \left(J^{-1/5} - 1 \right) - \frac{8}{9} \left(1 - J^{4/5} \right) \right]^{5/4} \quad (6.12)$$

onde:

Re é o número de Reynolds na *vena contracta*;

Então o perfil da linha de água é obtido combinando (6.2) com (6.12) e a relação de desenvolvimento da camada limite com (6.7) e (6.12). A determinação do ponto crítico onde a

camada limite aflora, ou seja, onde ela se encontra desenvolvida é dado por (6.2), (6.7) e (6.12).

Este método apresentou, conforme os autores citados, bons resultados comparados com os obtidos experimentalmente, tanto para predição dos perfis de linha de água como para descrição da camada limite. A única ressalva é que o modelo teórico não leva em consideração o gradiente de pressão adverso que sofre a camada limite ao longo do escoamento.

Como mencionado anteriormente, esse desenvolvimento visa uma caracterização completa do fenômeno aqui reproduzido. Obteve-se na aplicação dos equacionamentos às mesmas condições de ensaios (vazão e abertura da comporta), os seguintes resultados: para a maior vazão (menor número de Froude) a camada limite não se desenvolverá a jusante da seção de ensaio; já para as vazões que resultam nos números de Froude 3,8 e 7,0, foram encontradas as zonas de afloramento da camada limite a uma distância de 1,42 m e 0,64 m da *vena contracta* respectivamente.

Segundo a metodologia aqui adotada para posicionamento do ressalto hidráulico, descrita a seguir, pode-se considerar, para fins práticos, que a camada limite a montante dos ressaltos a serem ensaiados, encontra-se não desenvolvida, podendo então, caracterizar o escoamento supercrítico a montante do ressalto, como potencial.

6.2 Caracterização do número de Froude rápido

A caracterização do ressalto hidráulico está relacionada com o número de Froude na seção transversal da altura conjugada rápida e, portanto, com a velocidade nesta seção. Um vertedor na entrada no canal permite a determinação da vazão de entrada. Para calibração deste vertedor foi utilizado o método empírico proposto pelo *S.I.A.S. (Société des Ingénieurs et Architects Suisses)*. O método consiste em sucessivas medidas de velocidade em uma vertical, em diferentes seções e, a partir de integrações, determina a vazão na seção desejada. Devido à impossibilidade de remoção de sua posição, não foi possível a calibração do vertedor por um método mais preciso como o da cuba gravimétrica ou volumétrica. O item em anexo *Métodos de Calibração de Instrumentos de Medição (Anexo A)* descreve os procedimentos seguidos. Constatou-se também, nesse item, que a utilização da formulação teórica proposta pelo S.I.A.S para vertedores retangulares possibilita resultados que diferem de 0,3 % dos medidos *in loco* com um tubo de Pitot, sendo então essa formulação utilizada

para a determinação da vazão de entrada do canal. As vazões ensaiadas adotadas foram respectivamente 59,6 l/s, 29,4 l/s e 14,0 l/s.

Como anteriormente mencionado, a altura conjugada rápida foi adotada como sendo a profundidade do escoamento imediatamente a jusante da *vena contracta*. Para esta determinação, antes de cada ensaio era traçado o perfil da linha de água através de medidas com pontas linimétricas, identificando-se assim, a posição da *vena contracta*. Assim, a comporta no extremo de jusante (Figura 5.1) da seção de ensaio era então levantada até que houvesse a formação do ressalto com início nesta região. Devido à grande variação da posição do início do ressalto buscou-se identificar a sua posição média através da sombra formada junto ao fundo do canal, como forma de auxiliar seu posicionamento. Essa sombra era gerada por uma fonte luminosa posicionada na parte superior do início do ressalto. Analisando durante dois minutos a movimentação dessa sombra determinava-se, visualmente, sua posição média referenciada à comporta.

Ajustado este posicionamento, procedia-se o ensaio. Após seu término, a comporta no extremo de jusante do ressalto era novamente aberta, deixando resultar apenas o escoamento proveniente da comporta. No ponto da posição média do início do ressalto determinado visualmente, foi medida a altura rápida com uma ponta linimétrica móvel.

Para as vazões ensaiadas foram determinadas as seguintes alturas conjugadas rápidas: 6,46 cm, 3,36 cm e 1,37 cm. Com a altura e vazão determinadas, os ressaltos foram caracterizados pelos seguintes números de Froude 2,9, 3,8 e 7,0. A Tabela 6.1 apresenta um resumo das características dos ensaios e alguns resultados que serão discutidos posteriormente.

Tabela 6.1 – Dados experimentais.

Vazão (l/s)	h_1 (cm)	Velocidade (m/s)	Fr_1	Re_1	h_2 (cm)	
					Bélanger	Experimento
59,6	6,46	2,31	2,9	1,49E+05	20,23	23,69
29,4	3,36	2,19	3,8	7,36E+04	14,77	16,26
14,0	1,37	2,55	7,0	3,49E+04	12,21	12,92

h_1 é a profundidade do escoamento na seção rápida

h_2 é a profundidade do escoamento na seção lenta

7 Metodologia

Com o objetivo de visualizar características do escoamento macroturbulento em um ressalto hidráulico a jusante de uma comporta propôs-se uma metodologia centralizada em obter resultados eficientes aliada a baixos custos de implantação.

7.1 Método de Visualização

O método aqui proposto tem base na revisão bibliográfica apresentada. É importante salientar que os métodos utilizados para visualização do ressalto têm como finalidade explicar por meios diferentes o fenômeno: Hoyt e Sellin (1989) utilizaram o mesmo mecanismo de visualização, proposto neste trabalho, para comparar o ressalto a uma camada de mistura turbulenta; Mossa e Tolve (1998), partiram do mesmo método de visualização utilizado pelos autores anteriores, para medir a concentração de ar ao longo do ressalto, com a ressalva de usarem da digitalização de imagens na obtenção de resultados. Ambos trabalhos serviram de base para a metodologia aqui adotada.

Neste trabalho o instrumento utilizado para captura das imagens do ressalto hidráulico foi uma câmera de vídeo da marca Panasonic VHS modelo PV-610D (Panasonic, 1987). A câmera grava as imagens em forma de filme num padrão NTSC (*National Television Standards Commission*; Ulead Systems, 1997) em uma taxa de aquisição de 30 quadros por segundo. Nenhum tipo de filtro foi utilizado ou equipamento que alterasse a imagem original proveniente do ressalto.

À jusante da comporta foi montada uma janela de vidro com 2,10 m de comprimento e 50 cm de largura servindo como seção de trabalho para as visualizações (Figura 5.1). Uma escala métrica foi ajustada junto ao fundo do canal possibilitando imagens referenciadas, que auxiliaram no processo de análise das imagens digitalizadas do ressalto.

A iluminação, componente essencial do método de visualização do escoamento macroturbulento, deve ter uma intensidade que, devido ao escoamento bifásico, não ocasione excessiva reflexão, o que impossibilitaria qualquer visualização de detalhes do interior do ressalto. Contudo, uma iluminação intensa permite realçar as características externas e os

contornos. Na verdade a melhor opção seria uma iluminação que produzisse o efeito de mesma intensidade de luz para todo o escoamento. Isto se mostrou inviável, pois para tanto, o canal deveria ser todo transparente e o escoamento deveria ter a mesma concentração de bolhas de ar ao longo de seu comprimento. Uma alternativa viável para contornar o problema seria ensaiar um ressalto afogado, o que não permitiria atingir por completo os objetivos do trabalho.

Realizados diversos ensaios para determinação do melhor efeito da iluminação nas imagens digitalizadas, chegou-se a adoção de uma iluminação posicionada acima do ressalto (Figura 7.1) e, com diferentes intensidade de luz, ensaiar, durante intervalos de tempo fixados entre 2 a 3 minutos e mesmo número de Froude, com os seguintes padrões de iluminação (fluxo luminoso conforme manual técnico da PHILIPS):

- duas lâmpadas de halogênio (temperatura máxima 3200 K) produzindo um nível de iluminação de 5500 LUX;
- duas lâmpadas de halogênio produzindo um nível de iluminação de 3000 LUX e
- iluminação artificial proveniente do ambiente de lâmpadas fluorescente produzindo um nível de iluminação de 200 LUX,

sendo o procedimento repetido para todos os números de Froude.

É importante frisar que para o cálculo do nível de iluminação foi adotada uma perda de 25% da capacidade de iluminação devido ao tipo de calha em que se encontrava a fonte luminosa.



Figura 7.1 – Esquema de iluminação acima do ressalto com um nível de iluminação de 5500 LUX.

Foram realizadas dois tipos de tomadas de imagens. Uma onde a câmera era posicionada e nivelada de tal forma que o ressalto era visualizado por completo (Figura 7.1) e outra, onde partes do ressalto eram filmadas. Essa última tinha como objetivo focalizar detalhes do fenômeno e, para isso, centravam-se estas tomadas em quadros de 40 por 30 cm utilizando, tanto para a primeira quanto para a segunda tomada, a iluminação descrita anteriormente. Na verdade, o segundo tipo de tomada serviu apenas para descrição do fenômeno, enquanto a primeira para quantificação das características do ressalto.

Após a captura das imagens, estas foram digitalizadas por um processo que será descrito a seguir, tratadas e analisadas. O processo de digitalização é comum aos diferentes métodos e possibilita uma vasta gama de tratamentos e análises das imagens. Fica claro que, em qualquer conversão de sinais analógico - digital ocorrem perdas e, no caso de imagens digitalizadas, estas surgiram no aspecto da nitidez das imagens.

7.2 Método de Digitalização de Imagem

As imagens gravadas em fitas cassetes (sinais analógicos) são convertidas para imagens digitalizadas (sinais digitais) através de uma placa de vídeo WaveWatcher TV-PCI. A placa de vídeo possui resolução de imagens de 24 bit “*True Color*” com 1280 x 1024 pixels. A capacidade de captura é de 30 quadros por segundo e a placa suporta a maioria dos compressores de vídeo. Acompanhando a placa existe um programa de aquisição de imagens que auxilia no processo de digitalização. Alguns cuidados devem ser tomados para que a digitalização permita análises compatíveis aos objetivos do trabalho. A frequência de aquisição de imagens é de 30 Hz. Respeitando o teorema de amostragem de Shannon-Whittaker e o limite de frequência de amostragem de Nyquist, é possível reconstituir processos periódicos com até 15 Hz de frequência o que, no caso do ressalto, é suficiente, uma vez que a frequência de movimentação do início do ressalto e flutuações das características turbulentas são inferiores à 15 Hz (Marques et al. 1997).

O padrão de vídeo gerado pela filmadora usada é o NTSC (*National Television Standards Commission*). Para a digitalização a placa de vídeo dá outros padrões como PAL (*Phased Alternating Line*) e SECAM (*Sequential Couler Avec Memorie*).

O computador utiliza processador AMD-K6 II – 350MHz com 128 MB RAM e disco rígido Ultra DMA IDE com 6 GB. O monitor utilizado para análise das imagens é de 15” e a placa de vídeo AGP – 8MB “*on board*”. É importante neste momento fazer uma breve análise

dos componentes que afetam a qualidade de captura do vídeo. Deve-se ter em mente que a captura de vídeo requer um nível alto e consistente de desempenho do computador. A obtenção de bons resultados na captura depende do desempenho e capacidade de todos os componentes do sistema de trabalharem juntos no envio de quadros da placa de captura de vídeo para o processador e disco rígido. Esta capacidade depende dos componentes descritos a seguir.

A placa de captura de vídeo deve ser suficientemente rápida para capturar vídeo com o nível de qualidade que o meio final requer. Para vídeo NTSC em tela cheia e “*full – motion*”, a placa deve ser capaz de capturar trinta quadros por segundo (sessenta campos, pois cada quadro possui dois campos entrelaçados que juntos formam um quadro) a 640 x 480 “pixels” sem queda (*droppring*), ou perda de quadros. Para PAL e SECAM são designados vinte e cinco quadros (também 2 campos por quadro) a cada segundo a 720 x 576 “pixels”. Pode-se, caso seja necessário poupar memória, utilizar valores menores que os citados.

O disco rígido armazena os quadros capturados. Ele deve ser suficientemente rápido para armazenar os quadros capturados assim que chegam da placa de vídeo, caso contrário os quadros serão perdidos. Para capturar no padrão de vídeo NTSC, abaixo de 30 quadros por segundo, o disco rígido deve ter uma média de tempo de acesso (é a velocidade com que um disco rígido pode atingir os dados específicos) de 10 ms ou menos, e uma taxa de transferência de dados (é a velocidade com que o disco rígido pode mover os dados de e para o restante do computador) sustentada de pelo menos 3 MB por segundo mas, de preferência, ao redor dos 6 MB por segundo.

Outros fatores que influenciam a qualidade de captura são a unidade central de processamento, compactadores que podem existir na placa e o barramento de dados (conecta os componentes do sistema e lida com a transferência de dados entre eles).

Como mencionado acima, a necessidade de um bom desempenho do micro computador é explicada pelo processo de digitalização de imagens. À medida que a placa de vídeo recebe os sinais analógicos estes são transformados para sinais digitais através de sucessivas operações matemáticas (transformadas de Fourier) que processam grande quantidade de cálculos, aumentando o volume de memória RAM e do disco rígido requerido. Existe a possibilidade de utilizar compactadores de arquivo que a placa de vídeo fornece, mas esses compactadores influenciam diretamente na qualidade da imagem capturada. No processo de digitalização das imagens o programa cria um arquivo temporário para armazenar essas informações, só então o compactador irá atuar. Se a placa de vídeo não possui

velocidade de transferência de dados suficiente, ocorre a perda de quadros, limitando assim seu uso pois, geraria perda de informações importantes para a análise do fenômeno.

Outro importante fator a identificar é o tipo de saída que é gerada no processo. Dentre os existentes optou-se, por arquivos tipos AVI (Audio Video Interleave) que podem ser abertos na maioria dos computadores e programas de vídeo. A definição do tamanho por quadro é definida no momento da aquisição das imagens. Com as características do computador utilizado foi possível obter definições de 307.200 “pixels” por quadro (frame) e uma resolução de 320 x 240 “pixels” por quadro. Existem outras opção de resolução, mas esta foi a que possibilitou melhor qualidade e nitidez das imagens.

Em decorrência dos fatores citados, a transferência de dados entre a placa de vídeo e o computador ocorre a uma taxa de 25 quadros por segundo, até um tempo máximo de 11 s. Ou seja, é possível obter até 275 quadros por arquivo AVI gerado. A câmera gera 30 quadros por segundo, sendo assim, são perdidos 5 quadros a cada segundo, fato que não interfere na aquisição das informações necessárias para a análise do fenômeno. Neste processo o computador, ao adquirir as imagens, à taxa de 25 quadros por segundo, descartará 1 a cada 6 quadros sucessivos, até completar os 25 quadros em 1 segundo. Assim a placa de vídeo não capturará os quadros 6, 12, 18, 24 e 30. Isto equivale perder 0,17 s a cada segundo de filme digitalizado.

Todos os arquivos AVI gerados são transferidos para um diretório, com auxílio de um programa de edição de vídeo e fragmentados em um conjunto de imagens sucessivas que, unidas, seguem a mesma seqüência do vídeo original. Estas imagens RGB (*Red – Green – Blue*) são transferidas no formato “*Tagged Image Format File*” (TIFF) e tamanho correspondente à resolução 640 x 480 “pixels”. A partir de então, são tratadas, analisadas e impressas em papel para diferentes finalidades. É importante frisar que existe, além da perda de qualidade nas imagens no processo de digitalização, perda de qualidade nas imagens impressas, que muitas vezes não representa a realidade das imagens utilizadas para retirada dos resultados aqui apresentados. Os resultados apresentados no capítulo 8 são baseados nas análise feitas na tela do monitor.

Foi então adotado que, para a análise do fenômeno, o tempo de imagens processadas seria de 2 s, equivalente a 50 imagens sucessivas para cada número de Froude ensaiado. Este valor foi adotado em virtude do trabalho realizado por Long et al. (1991) que, a partir da análise de 2 s sucessivos das flutuações da posição do início do ressalto, conseguiram obter resultados sobre características médias e instantâneas satisfatórias.

7.3 Método de Análise das Imagens

O processo de digitalização das imagens influencia diretamente no processo de análise. No momento da digitalização várias opções referentes ao tipo e características de imagens geradas são fornecidas, facilitando ou não, o processo de análise do fenômeno. Estas opções, dentre elas o pré – tratamento das imagens, antes da digitalização, é aqui utilizado com diferentes objetivos.

Alguns programas de tratamento de imagens não permitem a análise ou modificação de imagens no formato RGB. Assim, é necessário, a conversão desta para uma imagem em 256 tons (ou graus) de cinza. As imagens em tons de cinza, sendo os extremos branco, 255, e preto, 0, propiciam um maior detalhamento dos fenômenos analisados. Parece estranho, mas ao transformar uma imagem RGB de 24 bits por pixel, onde temos 16.777.216 possibilidade de combinações de tons para cada cor (vermelho, verde e azul), conseguiu-se eliminar efeitos prejudiciais na análise, como por exemplo sombras e reflexos, que no caso de resalto (fenômeno bifásico) são evidenciados.

Para a identificação dos turbilhões utilizou-se, antes da digitalização, uma mudança nos níveis de contraste (valores entre 50% e 70% em relação à imagem original), brilho (valores entre 40% e 50%), cor (0 %) e saturação (0 %) das imagens a serem adquiridas. Com isso consegue-se identificá-los de forma clara sem que todas as imagens sofressem o mesmo tratamento isolado.

As imagens depois de processadas são abertas no programa *Image Tool*, de livre acesso pela Internet pelo endereço "macorb.uthscsa.edu/dig/itdesc.html", desenvolvido pela *University of Texas Health Science Center* de San Antonio, Texas, Estados Unidos da América, fornecendo ferramentas que são de grande utilidade prática. É possível fazer calibrações e medidas espaciais (comprimento, área e ângulo) e de densidade em imagens digitalizadas. O programa é capaz ainda de identificar objetos relacionando-os com coordenadas espaciais. Os resultados são armazenados em uma planilha, de uso compatível com as planilhas eletrônicas mais comuns.

Depois de abertas, as imagens, referenciadas a valores métricos, são calibradas. A referência utilizada é uma medida conhecida na base do canal que aparece na imagem digitalizada. Uma medida é solicitada pelo programa sendo referenciada a uma medida em uma unidade desejada (ex.: 375 unidades de pixels equivale a 60 cm). Esta calibração é

armazenada como padrão para, futuramente, qualquer medida extraída da imagem ter como referência a medida da calibração.

É importante salientar que foi respeitada, em cada imagem, a origem e sua resolução. Todas as imagens possuíam origem (0,0) no canto esquerdo superior e resolução 640 x 480 “pixels”. Esse procedimento somente foi possível porque as imagens foram digitalizadas em faixas onde a câmera estava fixa a determinada distância e foco. Cada vez que esta mudava de posição, nova calibração era feita e considerada como padrão.

Visualizando todo o ressalto, foi possível analisar:

- o comprimento do rolo e do ressalto;
- a altura conjugada lenta;
- o perfil do rolo e do ressalto e sua variação;
- a dimensão das ondas que se propagam para jusante;
- a dimensão e a trajetória dos turbilhões, como também, o mecanismo de entrada de ar e o acoplamento e crescimento dos turbilhões.

Esta técnica utilizada representa uma abordagem moderna para a análise do ressalto hidráulico. A maioria das informações existentes sobre o ressalto são provenientes de instrumentos intrusivos que, de alguma forma, interferem no escoamento podendo alterar a confiabilidade das medidas. Esta proposta vem eliminar estes problemas e incrementar, com o auxílio da digitalização de imagens, ferramentas que as antigas técnicas de visualização por fotografias não eram capazes de fazer. Hoje é possível visualizar todo o escoamento sem perda de informações, auxiliando no entendimento do fenômeno e no dimensionamento de obras hidráulicas, sendo, sem dúvida nenhuma, uma técnica de baixo custo de implementação e bons resultados.

7.4 Definição das Características do Ressalto Hidráulico

Um outro ponto de extrema importância na análise das imagens é a definição clara de certas características físicas do ressalto, deixando bem claro a zona de influência de cada uma destas.

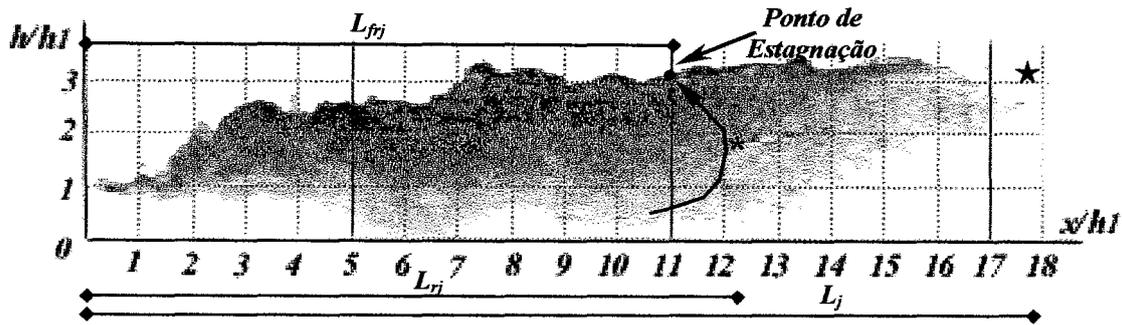
O final do ressalto foi definido como a distância longitudinal do escoamento desde o início do ressalto ao ponto onde não há mais presença de bolhas de ar, visualmente percebidas

pela análise do vídeo (Figura 7.2). As zonas de influência de bolhas de ar podem ser claramente identificadas pelas imagens obtidas, tal como observado no fenômeno. Quando ocorre o tratamento das imagens, este delineamento fica, algumas vezes, prejudicado, mas não representa erros significativos.

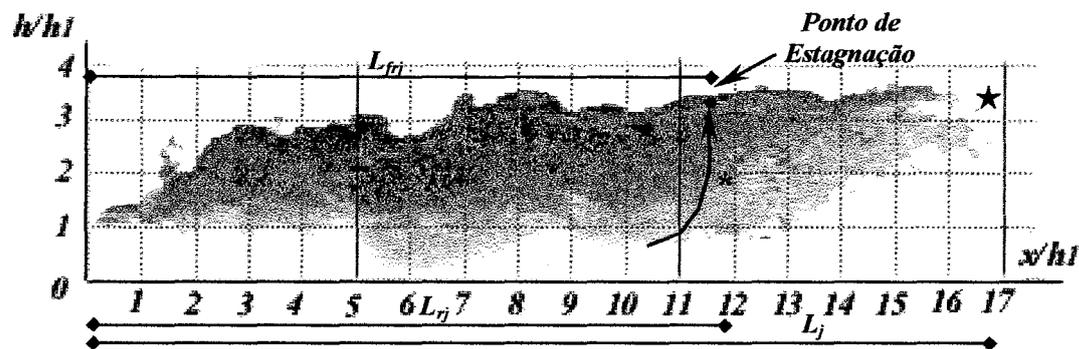
Esta definição tem importância porque diversos autores caracterizaram o final do ressalto de forma diferente da aqui apresentada e, na maioria dos casos, não apresentam as respectivas definições. Fica claro que os resultados apresentados enfatizam esse problema, propiciando uma crítica aos autores aqui mencionados sob o âmbito dessa questão. Esta definição adotada, não seria necessariamente um critério de segurança para dimensionamento de estruturas, mas, um padrão de aplicabilidade da técnica apresentada.

O final do rolo (L_{fj}) foi definido como a distância longitudinal do início do ressalto à posição onde ocorre o ponto de estagnação junto à superfície. O ponto de estagnação é caracterizado por velocidade nula, marcando a região de onde parte o refluxo do escoamento para montante e a propagação de ondas para jusante.

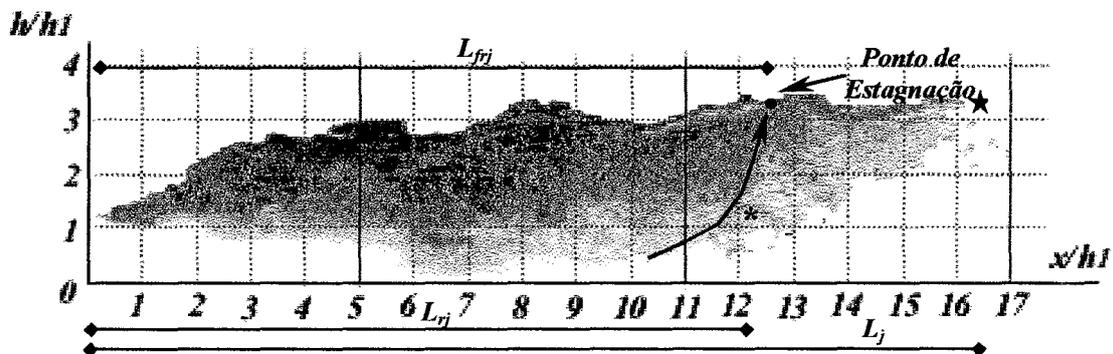
Com o objetivo de auxiliar no entendimento do fenômeno, propôs-se introduzir uma importante característica do ressalto hidráulico, sendo esta denominada como comprimento do rolo. Definiu-se como comprimento do rolo (L_{rj}) a distância longitudinal ao escoamento entre o início do ressalto e o ponto onde o maior e último turbilhão do rolo termina. É importante salientar que poderá ocorrer momentos em que o final do rolo (L_{fj}) seja igual ou até maior que o comprimento do rolo (L_{rj}). Esta definição possibilita entender as variações nas características físicas do rolo que serão mostradas nos resultados. A Figura 7.2 ilustra as definições. Como a figura é uma imagem estática, o ponto de estagnação pode ser difícil de identificar mas, quando analisadas no monitor de vídeo do computador, a sequência de imagens auxilia no processo de identificação destas definições.



(a)



(b)



(c)

(a) • final do rolo menor que o * comprimento do rolo; (b) final do rolo igual ao comprimento do rolo e (c) final do rolo maior que o comprimento do rolo; ★ final e comprimento do ressalto.

Figura 7.2 – Esquema Ilustrativo do final e comprimento do rolo e final do ressalto.

Foram analisadas as variações das superfícies da água para relacioná-las às variações de comprimentos anteriormente citados e início do ressalto ao longo do tempo. Assim, sempre que designarem-se pontos específicos da superfície do ressalto, estes estarão relacionados a sua posição longitudinal.

8 Resultados

8.1 Introdução

As técnicas de visualização de escoamento são métodos que exigem do pesquisador uma análise, em parte, subjetiva do fenômeno. Estas técnicas diferem de outras na medida que cada escoamento tem sua característica e está interligada diretamente ao processo usado para a visualização. É capaz de fornecer um grande número de informações sobre o fenômeno sem interferir no escoamento, em contraste, por exemplo, com uma sonda de velocidades ou de pressão que fornece dados de um ponto, provocando uma perturbação.

O ressalto hidráulico aparece como uma transição rápida das características médias do escoamento, que por conseguinte produz instabilidades na superfície da linha de água, possibilitando a entrada de ar, resultando numa cascata de bolhas de ar movendo-se contra o escoamento principal. Em consequência de observações do fenômeno e, para melhor caracterizá-lo, surgiu a definição do rolo. Em sua primeira concepção, o rolo foi descrito como a parte acima do escoamento que penetra em alta velocidade no ressalto hidráulico caracterizando-o como difusivo. A nomenclatura “rolo” difundiu-se por toda literatura e, é fato que, todo croqui ou esquema ilustrativo do ressalto apresentam-no como um escoamento rotacional procedente de uma região difusiva.

É importante salientar que uma das características mais expressivas do ressalto é a oscilação ou flutuação de suas grandezas físicas. A maioria das formulações encontradas, por exemplo, para a concentração de ar, os níveis de água ou as pressões sobre soleiras de bacias de dissipação, são válidas em termos médios. Então, para uma melhor compreensão do fenômeno deve-se levar em consideração, também, as características oscilatórias do ressalto.

8.2 Descrição visual do fenômeno

Após observações e pesquisa na literatura, partiu-se para descrição do fenômeno, de uma suposição básica: o ressalto hidráulico apresenta características semelhantes a uma camada de mistura turbulenta. Esta camada de mistura seria formada pelas condições do escoamento a montante e a jusante do ressalto, que proporcionam uma interação entre os fluidos ar e água num processo dissipativo de energia cinética. Esta energia cinética transforma-se para potencial ocasionado uma diminuição de velocidade média do escoamento

em uma curta distância. Na interface ar - água ocorre a mistura dos dois fluidos aerando o escoamento. O resultado é uma região difusiva de grande instabilidade da superfície da água.

A instabilidade da superfície é caracterizada pela formação e quebra de ondas que propiciam a entrada de ar (forma de bolhas); como também, participam no processo de geração de vorticidade (turbilhões) em macroescala, os quais penetram no escoamento produzindo a aparência do ressalto hidráulico.

Na verdade, os processos que envolvem o fenômeno em si podem ser abordados de diversas formas, como foi visto no capítulo 4 (Revisão Bibliográfica). Saber realmente o que gera a vorticidade, os turbilhões, a formação e quebra de ondas na parte superior e a saída do ar tem sido e será fonte de diversos estudos. Deve-se observar e analisar o fenômeno de diversas formas e partir então, para concluir o que realmente acontece.

Tratando o ressalto como uma camada de mistura, deve-se ter em mente, que junto ao fundo do canal existe um escoamento, usualmente denominado como escoamento potencial (núcleo potencial, conforme Sinniger e Hager 1989), termo utilizado para designar a zona do jato não perturbado. Este por sua vez diminui de tamanho até uma certa posição onde ocorre o descolamento da camada limite turbulenta (existe a formação de um gradiente de pressão adverso), onde sua caracterização não pode ser mais feita. Esta camada é caracterizada pelo fluido água com grande velocidade e, junto à superfície, existe o fluido ar em repouso. O rolo se desenvolverá nesta interface semelhante a uma camada de mistura.

As características turbulentas do ressalto, por ser um escoamento bifásico, não podiam ser medidas facilmente. Então alternativas foram sugeridas para execução de tal tarefa, na qual uma delas chama bastante atenção para descrição aqui abordada. Rajaratnam (1965.b) introduziu o ressalto hidráulico como um jato de parede. Com isso ele conseguiu medir as características turbulentas, até então, associadas a uma comparação em um escoamento de ar em um difusor proposto por Rouse et al. (1959). Sabe-se que no jato existe a camada de mistura e esta se forma devido ao escoamento potencial de um jato encontrar um entorno de gradiente de pressão adverso. Então, quando se caracteriza o ressalto como uma camada de mistura, deve-se ter a preocupação de entender os mecanismos que lá ocorrem.

Jimenez (1980) propôs explicar o mecanismo no qual ocorre o crescimento da camada de mistura turbulenta, fazendo considerações que são de extrema importância na análise visual do ressalto hidráulico. Hoyt e Sellin (1989) fizeram esta comparação e “realmente a semelhança é fascinante” na expressão dos autores. Por este motivo, neste trabalho a visão adotada do ressalto não se diferenciará muito da comparação a uma camada de mistura

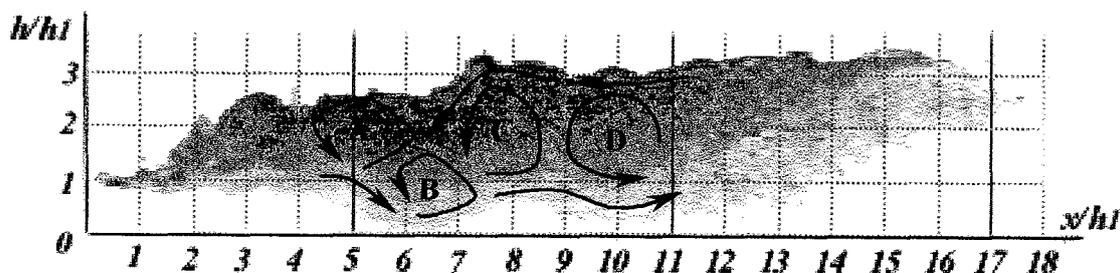
turbulenta. Contudo, um dos objetivos a serem alcançados é o de acrescentar algumas características pertinentes ao ressalto utilizando uma metodologia de visualização diferente e de baixo custo.

Jimenez (1980) fez considerações sobre o processo de crescimento da camada de mistura turbulenta mencionando uma que auxilia na compreensão do processo de crescimento e interação dos turbilhões no ressalto. Ele diz que um modelo de crescimento de vórtices em uma camada de mistura turbulenta só representa a realidade se este modelo considera o processo de interação entre eles. Se estes vórtices são transportados com a mesma velocidade e, sem se dissipar, seria impossível para eles crescerem sem uma interação. Isso elucidada, de certo modo, o mecanismo de crescimento e acoplamento dos turbilhões no ressalto hidráulico, não esquecendo as observações de Winant e Browand (1974) apresentadas no capítulo de *Revisão Bibliográfica item 4.11*.

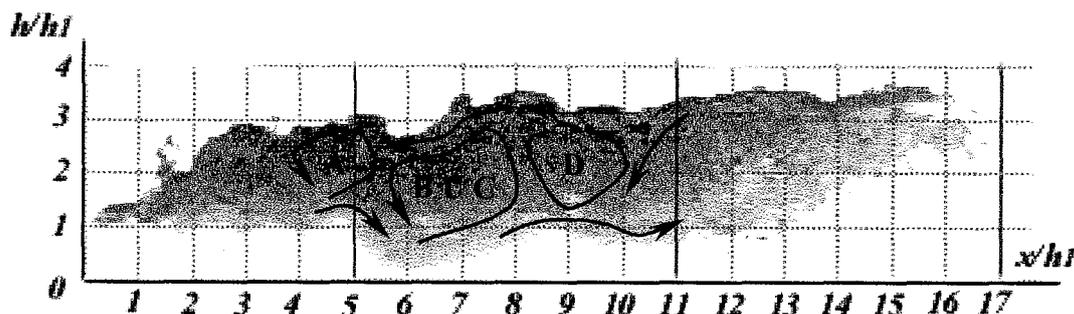
Long et al. (1991) afirma que os turbilhões interagem, crescendo por acoplamento, movendo para jusante até o final do rolo, onde seu tamanho é máximo. Após atingirem o final do rolo dissipam produzindo refluxo para montante.

Essa pequena retomada da revisão bibliográfica (capítulo 4) visa auxiliar nas descrições do ressalto, como também, sedimentar as observações até hoje existentes. Retomando a descrição do fenômeno, serão apresentadas nas figuras a seguir imagens obtidas nos ensaios para número de Froude 2,9 que complementaram a análise feita.

Na Figura 8.1 são apresentadas duas imagens sucessivas, com intervalo de tempo de 0,04 s entre elas, onde a parte cinza indica a zona aerada do ressalto. Estas imagens resultam de um corte longitudinal junto à parede de vidro do canal e foram digitalizadas e tratadas como descrito no capítulo *Metodologia*. Observando os turbilhões A, B, C e D pode-se acompanhar o processo de acoplamento entre dois deles. Em (a) o turbilhão B, mais abaixo, e o turbilhão C, acima e mais lento devido à corrente superior para montante, formam um padrão típico de acoplamento. Em (b) os turbilhões B e C acoplaram apresentando uma zona de influência maior que os próprios turbilhões independentes. Esta zona não se restringe apenas aos turbilhões. Pode-se notar a existência de uma geração localizada de instabilidade da superfície de linha de água visível na Figura 8.1 pela contração sofrida (em (b) termina em $x/h_1 \approx 16$ e em (a) em $x/h_1 \approx 18$) e pela altura dos níveis (em (b) para x/h_1 entre 2 e 8). A instabilidade descrita é nada menos que o início da formação de ondas que será mais a frente discutida.



(a)



(b)

U é símbolo matemático de união

Figura 8.1 – Acoplamento entre turbilhões vizinhos entre 5 e 8 x/h_1 para Froude 2,9.

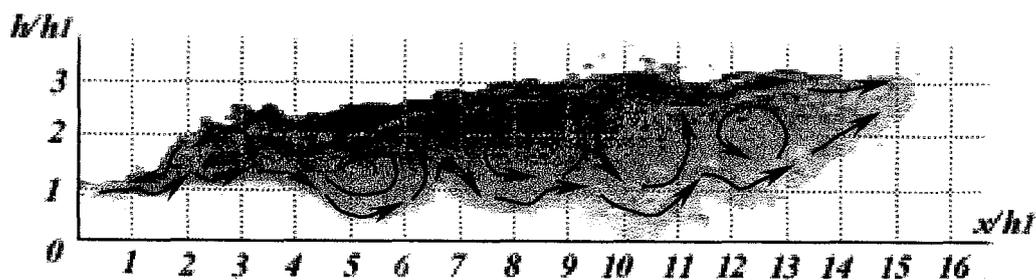
O crescimento dos turbilhões segue um certo padrão já que o processo de acoplamento está ligado ao deslocamento do início do ressalto. Quando o ressalto contrai faz com que turbilhões vizinhos se acoplem. Após o término desse processo, o ressalto estira-se ocorrendo um certo movimento aparente do turbilhão para jusante.

Este movimento é relativo porque o início do ressalto também moveu-se para montante dando a impressão de um crescimento junto a um deslocamento. Long et al. (1991) também observaram que à medida que os turbilhões interagem, são deformados em uma forma tipo elíptica como se fosse um “olho de gato”, como também descrito por Jimenez (1980). Outro fator é que os turbilhões após atingirem seu tamanho máximo tendem, a reduzirem até o tamanho da amplitude da onda que se propaga para jusante, desaparecendo totalmente na parte superior do final do ressalto.

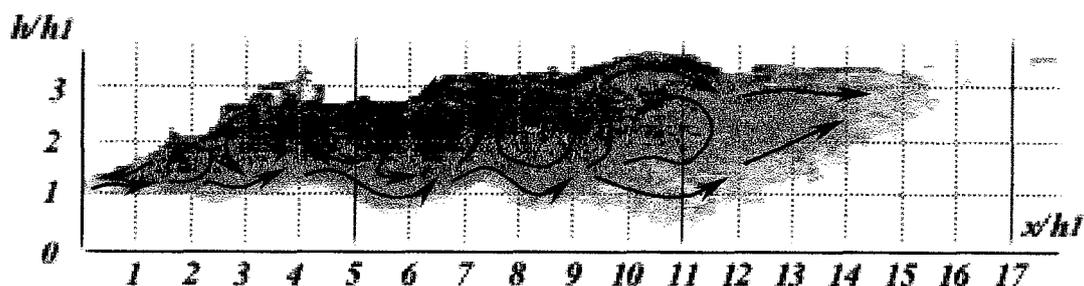
Durante o processo de descrição da formação, desenvolvimento e dissipação dos turbilhões, percebeu-se, a partir de diversas imagens analisadas, um padrão entre as ondas junto à superfície da água e o desenvolvimento dos turbilhões. Este processo de interação ondas – turbilhões auxiliam no crescimento e movimentação desses. É importante revisar que, segundo Hornung et al. (1995) num resalto que se propaga (ressalto não fixo a uma única

posição) a vorticidade é gerada no início do ressalto pela interação entre a onda de propagação e o escoamento principal. Este resultado apresentado por Hornung et al. (1995) ligado à visualização do fenômeno levaram a uma descrição simplificada deste processo.

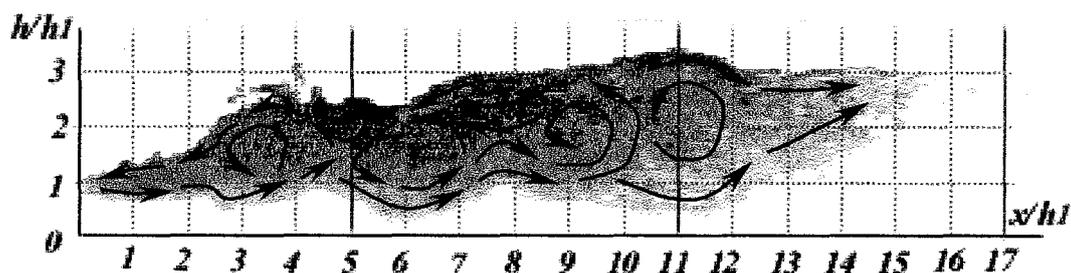
Uma questão essencial para descrever o padrão de crescimento de turbilhões e o processo de interação ondas – turbilhões (Figura 8.2), é entender como eles se movimentam. Novamente são apresentadas imagens sucessivas com tempo entre elas de 0,04s. Nelas pode-se observar que os eixos transversais dos turbilhões não somente realizam movimentos longitudinais como também movimentos verticais, resultado da formação e quebra de ondas na superfície da linha de água do ressalto. Uma das questões é identificar a relação de causa/conseqüência neste processo interativo. Constatou-se que a formação dessas ondas resulta da movimentação ascensional dos turbilhões. Estas ondas quebram e se reintegram ao escoamento, causando o movimento descendente do turbilhão que a gerou, causando o ascensional do seu sucessor. É um padrão que se prolonga até o final do ressalto, onde os turbilhões se dissipam em forma de ondas. A melhor maneira de entender o desenvolvimento dos turbilhões é acompanhar seu surgimento e desaparecimento.



(a)



(b)



(c)

(a) início e caracterização dos turbilhões; (b) interação onda – turbilhão; (c) início do processo de acoplamento entre turbilhões vizinhos.

Figura 8.2 – Fenômeno de interação entre ondas superficiais – turbilhões no interior do ressalto para número de Froude 2,9.

É possível visualizar que o escoamento na parte superior do ressalto, apresentado primeiramente pelos perfis de velocidades de Rouse et al. (1959), Rajaratnam (1965.b) e mais tarde Hornung et al. (1995), penetra no escoamento, no início do ressalto, causando a primeira fonte de vorticidade (Figura 8.2). A partir daí os turbilhões começam a crescer por acoplamento, quebra, reintegração e interação com as ondas da superfície, sendo esta a segunda fonte de vorticidade. Os turbilhões, movimentando-se para jusante, penetram no escoamento (núcleo) usualmente designado como potencial, até próximo ao final do rolo,

onde provavelmente ocorra o descolamento da camada limite. Neste local o processo de crescimento do turbilhão já terminou, iniciando assim sua dissipação. Este processo de acoplamento e movimento dos turbilhões faz com que o ressalto contraia e expanda-se movimentando a posição de início do ressalto. À medida que se contrai, a relação de alturas conjugadas aumenta propiciando ainda mais a formação e a quebra de ondas e a maior entrada de ar. Quando o ressalto é alongado existe o maior número de turbilhões, propiciando assim, maior saída de ar. No processo de propagação e crescimento dos turbilhões para jusante, a velocidade do escoamento potencial diminui. Aplicando a lei de conservação de momento angular ao rolo pode-se justificar então porque os turbilhões diminuem sua velocidade de rotação.

Esta descrição do ressalto hidráulico é genérica, pois o rolo ainda não foi caracterizado. Considerando as esquematizações do ressalto hidráulico feitas na literatura e os perfis de velocidades apresentados pode-se definir o rolo como sendo a porção do ressalto onde ocorre o refluxo do escoamento para seu início. Trabalhando sobre este aspecto, caracterizá-lo torna-se mais fácil. No rolo, os turbilhões sofreriam apenas processos de crescimento e a entrada de ar seria mais expressiva que sua saída, até 40 % do comprimento do ressalto (Mossa e Tolve, 1998), onde a saída torna-se predominante. O rolo, em seu desenvolvimento, penetra no escoamento potencial à medida que propaga para jusante, pelo simples motivo que os turbilhões crescem de tamanho. Estes, por sua vez, têm tamanho na ordem de grandeza da profundidade do escoamento em qualquer parte do rolo. Após o rolo, os turbilhões se dissipariam e a saída de ar seria completada, mas o que caracteriza o final do rolo é o ponto onde a camada limite descola-se, e o último e maior turbilhão, localizado na parte superior do rolo, produz uma elevação do escoamento junto à superfície, aparentando visualmente, um ponto de estagnação junto àquela. A montante desse ponto ocorreria o refluxo do escoamento propiciando material para formação de novos turbilhões e, para jusante, a propagação de ondas. Como já mencionado, neste ponto a saída de ar é bem expressiva e não mais existe entrada de ar no escoamento. Este foi o critério adotado, para fins do estudo, como sendo o final do rolo do ressalto. O último turbilhão deforma-se de acordo com o processo de interação dos turbilhões no rolo, causando grande flutuação das suas dimensões. O final do ressalto, por consequência, seria o final da saída de ar, visualmente percebida.

A entrada de ar no ressalto é feita ao longo de seu desenvolvimento pelas partes superior e inicial. O processo de quebra de ondas, que é mais intenso no início do ressalto, propicia maior entrada de ar chegando ao seu máximo em 20 a 30 % do seu comprimento

(Mossa e Tolve, 1998). Outro motivo para a maior entrada de ar ocorrer no início é a movimentação da posição inicial do ressalto. As bolhas de ar interagem entre si, crescendo ou implodindo, mas sua forma, sua distribuição e seu tamanho estão estreitamente ligados às características do escoamento na entrada do ressalto (Resch et al., 1974; McCorquodale e Khalifa, 1983).

8.3 Considerações para a obtenção das características externas e internas do Ressalto Hidráulico

As características geométricas do canal onde os ensaios foram realizados, possibilita simular ressaltos na faixa de número de Froude 2,8 a 7,0. No entanto, devido ao tamanho da janela na seção de ensaio, a determinação da altura conjugada lenta e do final do ressalto para o número de Froude 2,9 ficou prejudicada, sendo seus resultados extrapolados, quando possível, a partir daqueles obtidos para os demais números de Froude.

Foram ensaiados diferentes tipos de ressalto, números de Froude 2,9; 3,8 e 7,0, demonstrando a viabilidade da técnica de visualização aqui desenvolvida. Para cada número de Froude foram analisadas 50 imagens sucessivas com intervalo de tempo entre elas de 0,04 s, totalizando um tempo de análise de 2 s.

Para obtenção dos dados aqui apresentados foi tomado, para todas as imagens, um mesmo ponto fixo de referência a jusante da comporta e, a partir desse, retirada a delimitação do escoamento aerado do rolo e do perfil da linha de água da superfície até o final do ressalto. Esta metodologia possibilitou analisar simultaneamente, a relação de alturas conjugadas, o comprimento do rolo e do ressalto, propagação de ondas para jusante do ressalto e as variações das posições longitudinais do início do ressalto, do final do rolo e do ressalto, ao longo do tempo, relacionando-as, também, entre si.

A análise conjunta dessas variações constava na obtenção de seus valores médios referentes a esse ponto fixo, a partir dos quais, os valores medidos eram diminuídos, passando à média zero. Com essa “translação”, eram então analisadas somente as variações de suas amplitudes ao longo do tempo. Essa nova abordagem de análise do fenômeno possibilitou constatar padrões de comportamento que as abordagens até então utilizadas não permitiram.

Quando se analisou as características usuais apresentadas na literatura, como a relação de alturas conjugadas, do comprimento do rolo e o do ressalto, foram somente apresentados os valores médios obtidos das 50 imagens. Isso viabiliza uma comparação com os valores

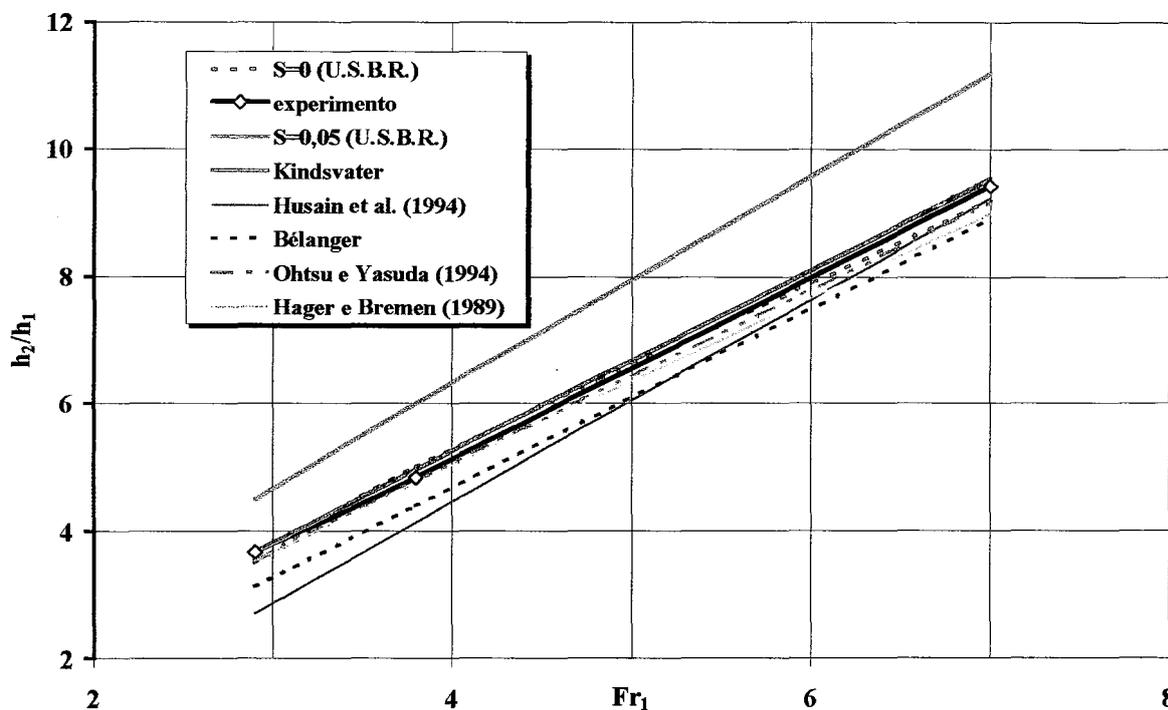
encontrados na literatura, já que, como mencionado anteriormente, a maioria dos resultados são apresentados em termos médios.

8.4 Alturas Conjugadas

Todas as formulações que calculam a altura conjugada lenta a partir da rápida, em um ressalto hidráulico, apresentam-se adimensionalizadas na forma h_2/h_1 . Será então esta a padronização adotada.

A técnica aqui abordada determinou apenas a altura conjugada lenta. A altura conjugada rápida foi medida *in loco* com auxílio de uma ponta linimétrica (conforme representado na Tabela 6.1).

A escolha das relações a serem comparadas baseou-se em: formulações que representassem as variáveis físicas do fenômeno e formulações empíricas e teóricas, como as formulações clássicas de Bélanger para fundo plano e de Kindsvater para fundo inclinado.



h_1 e h_2 são respectivamente alturas conjugadas rápida e lenta.

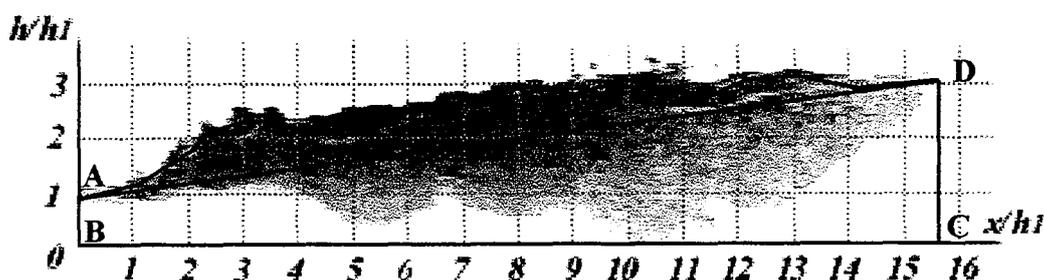
Figura 8.3 - Relação entre alturas conjugadas para valores do número de Froude e comparação com diversos autores.

A Figura 8.3 deixa bem claro que a influência da declividade do canal, de 0,2%, é praticamente desprezível para determinação da altura conjugada lenta. A comparação entre os valores obtidos através das imagens e a formulação teórica do Kindsvater revela diferenças na ordem de, apenas, 2%. Para as formulações do *Bureau of Reclamation* ($S = 0$), Hager e Bremen (1989) e Ohtsu e Yasuda (1994) as comparações foram satisfatórias com erros menores a 4%. Com relação a Husain et al. (1994) pode-se justificar a discrepância na comparação dos resultados devido a sua formulação empírica derivar-se de canais com maiores declividades do que o utilizado. A diferença entre os valores encontrados e os de Bélanger se deve a esse último não levar em consideração os efeitos viscosos e forças de cisalhamento junto ao fundo do canal. A formulação de Kindsvater também não apresenta esses termos, mas a consideração da componente devido à força peso reduz esta diferença.

Pode-se concluir que a técnica utilizada para obtenção da relação de alturas conjugadas é satisfatória.

8.5 Coeficiente de correção entre o perfil curvo e retilíneo do ressalto - K

O coeficiente K é a relação entre a área curva do perfil do ressalto e a área considerando um perfil linear. Esta área multiplicada por uma largura unitária representa o volume do ressalto para o cálculo da componente peso para formulações de alturas conjugadas em canais de fundo inclinado (Figura 8.4).



Obs.: K é a relação entre a área ABCD com o trecho AD sinuoso e ABCD com o trecho AD reto.

Figura 8.4 – Esquema ilustrativo da determinação do coeficiente K .

Foram analisadas 45 imagens para cada um dos três números de Froude ensaiados contra 440 analisados por Husain et al. (1994) e apresentado os valores médios de K na Figura

8.5. Pode-se verificar que os resultados diferem de 14%, no máximo. Acredita-se que esta variação deriva-se do método utilizado para medir as áreas em questão. Não foi possível precisar qual o método utilizado por Husain et al. (1994), mas considerou-se, neste estudo, a real curvatura do perfil de linha de água do ressalto.

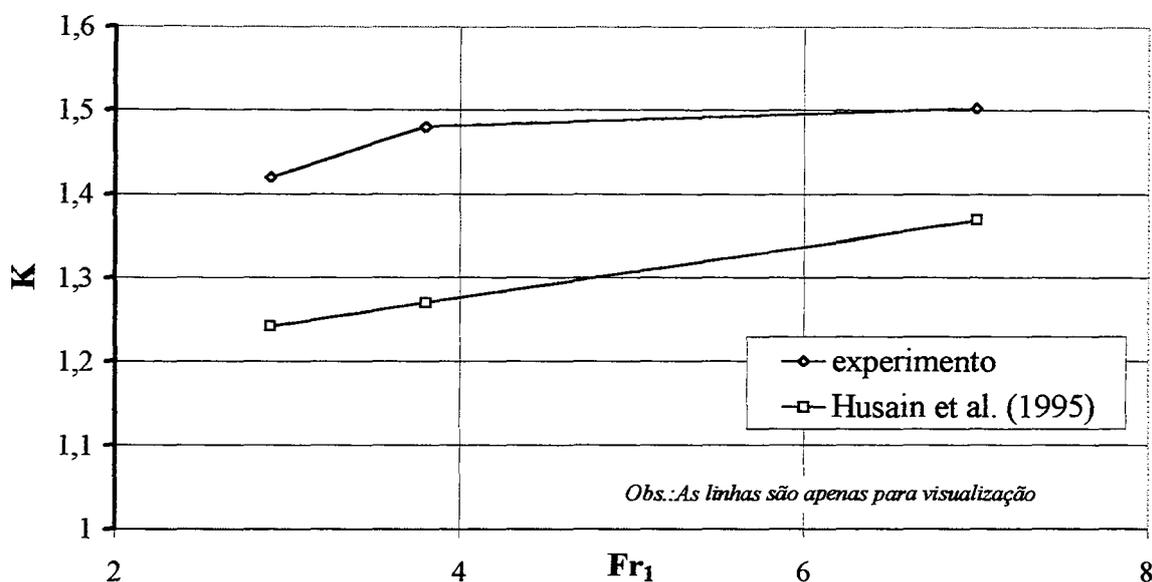
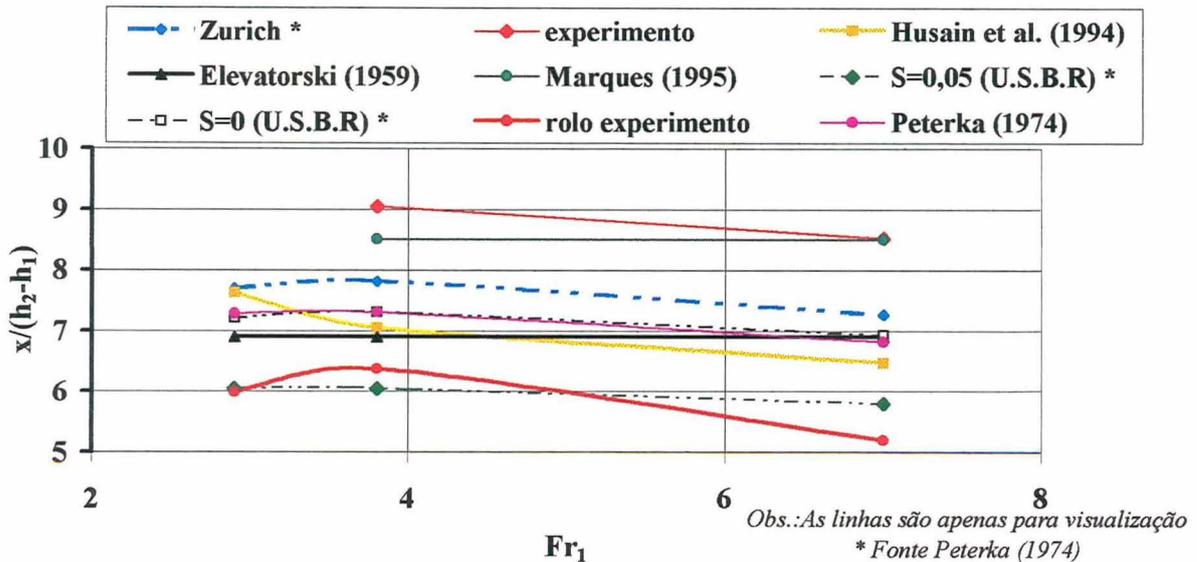


Figura 8.5 - Coeficiente K de correção do perfil longitudinal para valores de número de Froude.

Os valores de K encontrados foram utilizados no cálculo de altura conjugada lenta teórica segundo Kindsvater.

8.6 Comprimento do Rolo e do Ressalto

Como previamente definido no capítulo 7 item 7.3 (*Método de Análise das Imagens*), o comprimento do ressalto foi comparado com os resultados de diversos autores. A maioria dos resultados analisados estão na forma gráfica. Então para melhor entendimento, a comparação será apresentada na Figura 8.6 juntamente com os resultados obtidos nos experimentos realizados.



x é a posição longitudinal do início do ressalto.

Figura 8.6 - Comprimento do rolo e do ressalto obtidos para valores do número de Froude e comparações entre diversos autores.

Pode-se notar que os resultados obtidos para o comprimento do ressalto encontram-se fora da faixa de autores como Peterka (1974), Elevatorski (1959) e *Bureau of Reclamation* (1974). Para Marques et al. (1997), existe um indicativo de convergência de valores para o número de Froude 7, considerado satisfatório. Acredita-se que a diferença é devida a definição do final do ressalto adotado por Marques et al. (1997), como sendo o local onde a flutuação de pressão assume um valor constante, o que de certa forma, é mais coerente com a definição adotada neste trabalho.

Para os outros autores uma explicação razoável é a definição do comprimento do ressalto. Para exemplificar, Rajaratnam (1967) definiu o final do ressalto clássico como “a seção onde a superfície encontra-se nivelada”. Isso pode acarretar erros da ordem aqui apresentados.

O comprimento do rolo é também apresentado na Figura 8.6. Pode-se observar que esse encontra-se no envoltório inferior dos comprimentos do ressalto apresentados na literatura. A intenção de apresentar os comprimentos do rolo e do ressalto juntos visa salientar uma inexistência de consenso sobre onde termina a zona de influência de cada um deles. Pelas definições aqui adotadas para aplicação da técnica desenvolvida pode-se considerar que os resultados estão de acordo com a literatura, pois, além de representarem uma envoltória, são necessariamente concepções mais conservadoras para critérios de dimensionamento de estruturas.

8.7 *Características Oscilatórias do Ressalto Hidráulico*

O ressalto hidráulico é um fenômeno turbulento cujas características oscilam durante o tempo. Quando se refere a características médias em função de parâmetros oscilatórios deve se ter em mente dois fatores: o estudo das frequências dominantes, e, o tempo de análise do fenômeno. Devido a estudos prévios como o de Long et al. (1991) de visualização e estudos das características turbulentas por Rouse et al. (1959) e Rajaratnam (1965.b) e, bem mais tarde, o estudo das flutuações de pressão em soleiras de bacia de dissipação por ressalto hidráulico por Marques et al. (1997), procurou-se adotar o máximo da capacidade do sistema de aquisição de imagens, resultando em um tempo de aquisição de 2 s, ou seja 50 imagens consecutivas.

A intenção não é buscar frequências dominantes, mas sim, determinar características externas e internas, médias e instantâneas do fenômeno. Sabe-se que é necessário um estudo mais aprofundado para determinar conjuntos amostrais que melhor representem a população do fenômeno aqui abordado. Mesmo não sendo este o objetivo principal, houve a preocupação de realizar através de uma descrição estatística simples (desvio padrão, assimetria e curtose), uma análise que possibilitou concluir que este tempo de amostragem é satisfatório para atingir os objetivos deste trabalho.

8.7.1 *Início do Ressalto*

O início do ressalto possui, dentre outras, uma característica oscilatória de grande importância no âmbito do dimensionamento das estruturas hidráulicas onde ele ocorre. Determinando sua amplitude de variação pode-se dimensionar, com maior segurança áreas de maiores esforços hidrodinâmicos. Foi constatado pelos resultados, Figura 8.7 e Tabela 8.1, uma variabilidade em função do número de Froude, como também, sua relação com as outras macrocaracterísticas do ressalto; o que será discutido a seguir.

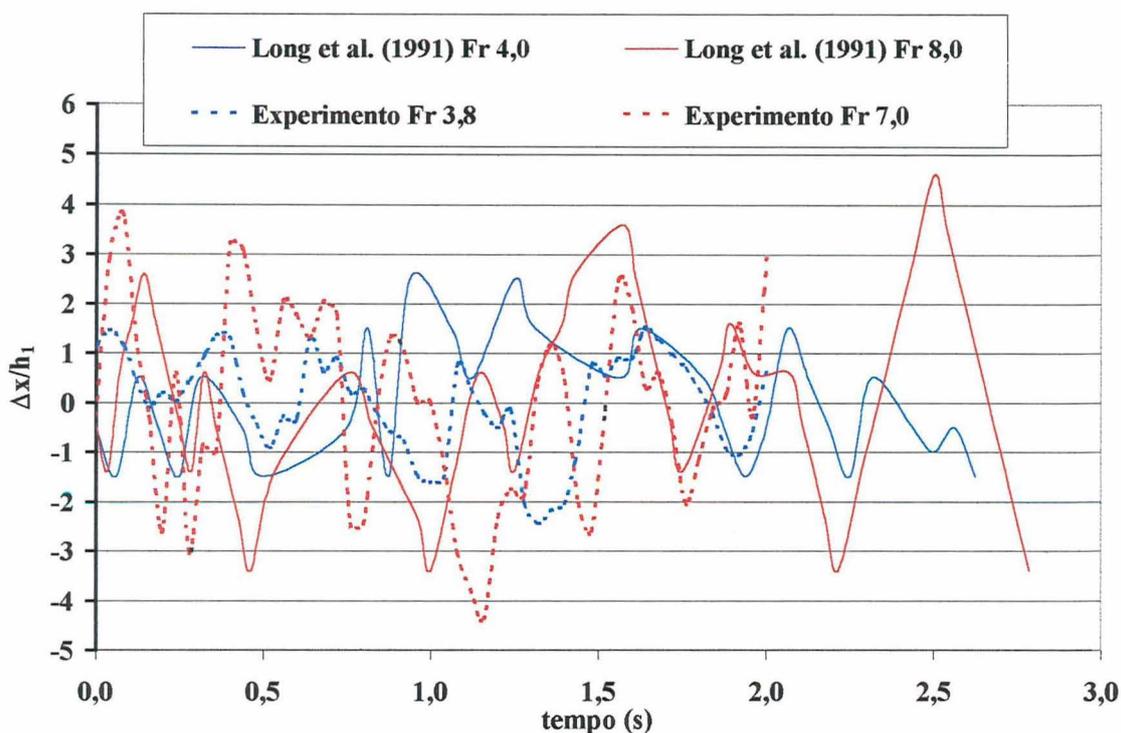


Figura 8.7 - Variação da posição inicial do ressalto em função do tempo.

Na Figura 8.7 os resultados obtidos são comparados com os de Long et al. (1991). Para tal, todos os resultados estão adimensionalizados por $\Delta x/h_1$, que representa a variação da amplitude da posição inicial do ressalto cuja média é zero. Podem-se verificar ordens de grandeza da amplitude e padrões de comportamento semelhantes. Quando o início do ressalto tende mais a montante do valor médio da posição do início do ressalto, ele ali permanece por intervalos de tempos semelhantes, oscilando entre pequenas distâncias até inverter de posição, indo para jusante e ficando ali praticamente o mesmo tempo. Assim, o início do ressalto respeita um padrão de movimentação, onde tempos de permanência subseqüentes são semelhantes para posições relativas referentes ao valor médio obtido. Deve ficar claro que a variação de comportamento não possui o mesmo início e fim, pois são eventos diferentes e a forma em que os ressaltos foram ensaiados são diferentes. Long et al. (1991) limitou a variação do início do ressalto pela comporta, diferentemente do procedimento aqui adotado, na qual o início era totalmente livre para movimentar-se sem qualquer interferência.

Tabela 8.1 – Características estatísticas da variação da posição inicial relativa ($\Delta x/h_1$) do ressalto obtidos e comparados com Long et al. (1991).

<i>n</i> ^o . de Froude	<i>Experimento</i>			<i>Long et al. (1991)</i>			
	2,9	3,8	7,0	4,0	6,0	8,0	9,0
<i>Desvio Padrão</i>	0,30	1,03	1,96	1,22	1,44	1,92	1,66
<i>Coef. de Assimetria</i>	-0,19	-0,62	-0,19	0,46	-0,13	0,18	0,17
<i>Coef. de Curtose</i>	-0,65	-0,33	-0,65	-0,72	-0,37	-0,41	-0,22

Analisando a Tabela 8.1 observa-se a tendência do desvio padrão aumentar com o número de Froude. Esta tendência será justificada com base na análise da Figura 8.8. Os coeficientes de assimetria e curtose apresentam-se mais sensíveis a variações do que o desvio padrão. Pode-se então considerar que o coeficiente de assimetria apresentou valores da mesma ordem para 2,9; 6,0; 7,0; 8,0 e 9,0. Observando os valores obtidos foi constatado que, salvo para os números de Froude próximos a 4,0, seu valor tende a variar significativamente. Este fato pode ser decorrência tanto da física do problema quanto da seleção de parâmetros amostrais.

Na Figura 8.8 os pontos de máxima amplitude Δx_{\max} desse trabalho e de Long et al. (1991), adimensionalizados segundo o parâmetro proposto por esses últimos autores, são plotados na tentativa de encontrar uma tendência. Pode-se observar que existe uma tendência de $\Delta x_{\max}/h_1$ crescer com o número de Froude. Devido a existência de poucos resultados experimentais, uma curva $\Delta x_{\max}/h_1 = Fr_1$ é sugerida visando uma aplicação direta. Esta curva é válida para números de Froude de 3 a 9.

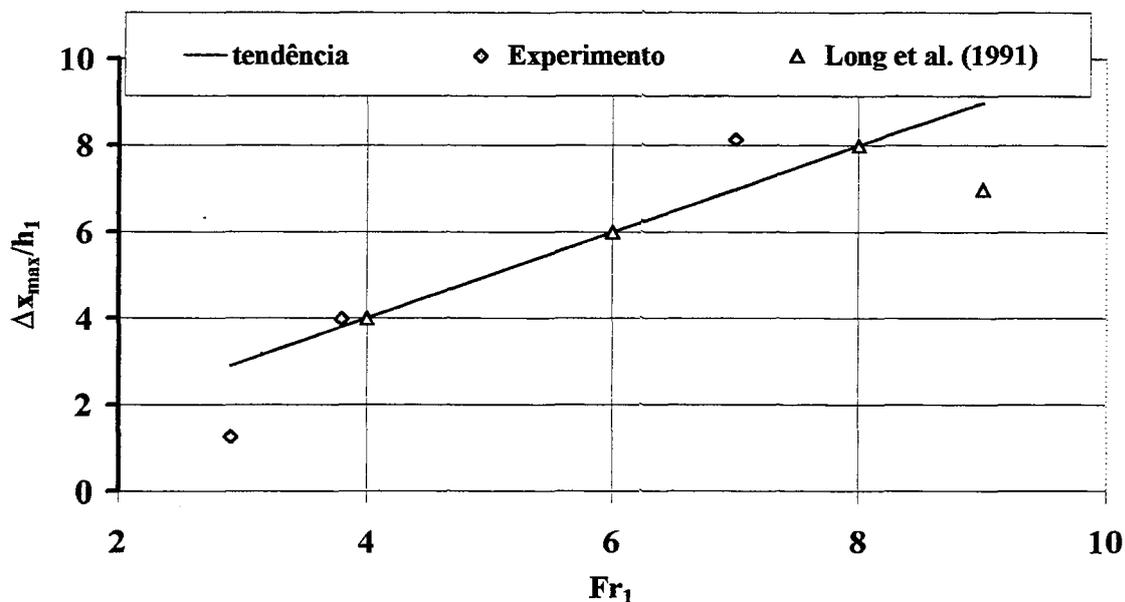


Figura 8.8 - Análise da máxima amplitude de variação da posição relativa do início do ressalto em função do número de Froude rápido.

Voltando à adimensionalização proposta no capítulo 6 (*Caracterização do Problema*), pode-se analisar uma interessante característica referente à movimentação do início do ressalto. Observando a Figura 8.9 nota-se uma tendência do início do ressalto encontrar-se mais a jusante da sua posição média. Nas Figura 8.9, Figura 8.10, Figura 8.11 e Figura 8.12 os valores da variação da posição inicial do ressalto $\Delta x/(h_2 - h_1)$ são agrupados em blocos cujos valores iniciais e finais são apresentados nas figuras. O limite superior de cada bloco é dado pelos valores a direita dos mesmos, com exceção ao último, que é designado como “valores maiores que”. O valor médio de $\Delta x/(h_2 - h_1)$ é zero.

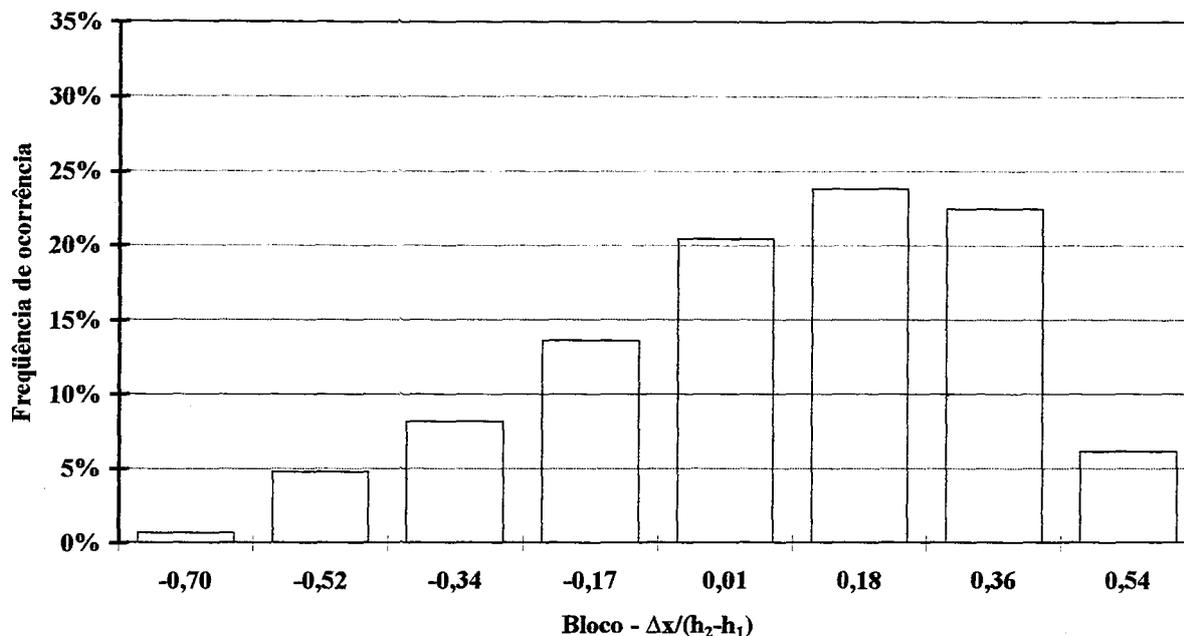


Figura 8.9 - Histograma de frequências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para números de Froude 2,9, 3,8 e 7,0.

Complementando a análise da Figura 8.9, serão apresentados os histogramas de frequência para cada número de Froude (Figura 8.10, Figura 8.11 e Figura 8.12) e suas respectivas estatísticas descritivas.

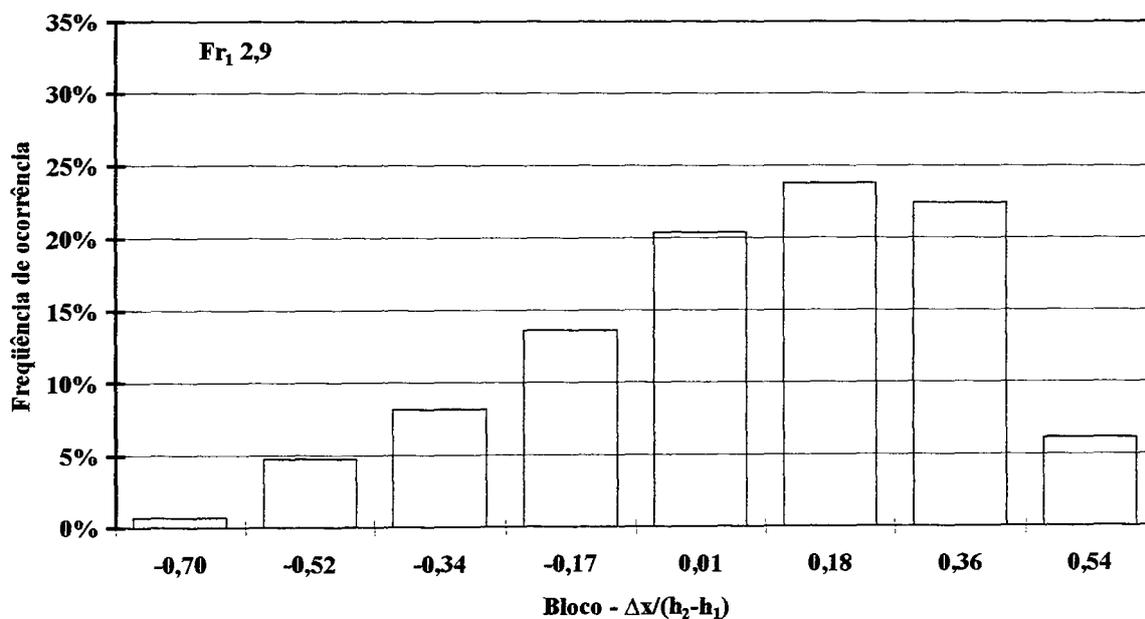


Figura 8.10 - Histograma de frequências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para o número de Froude 2,9.

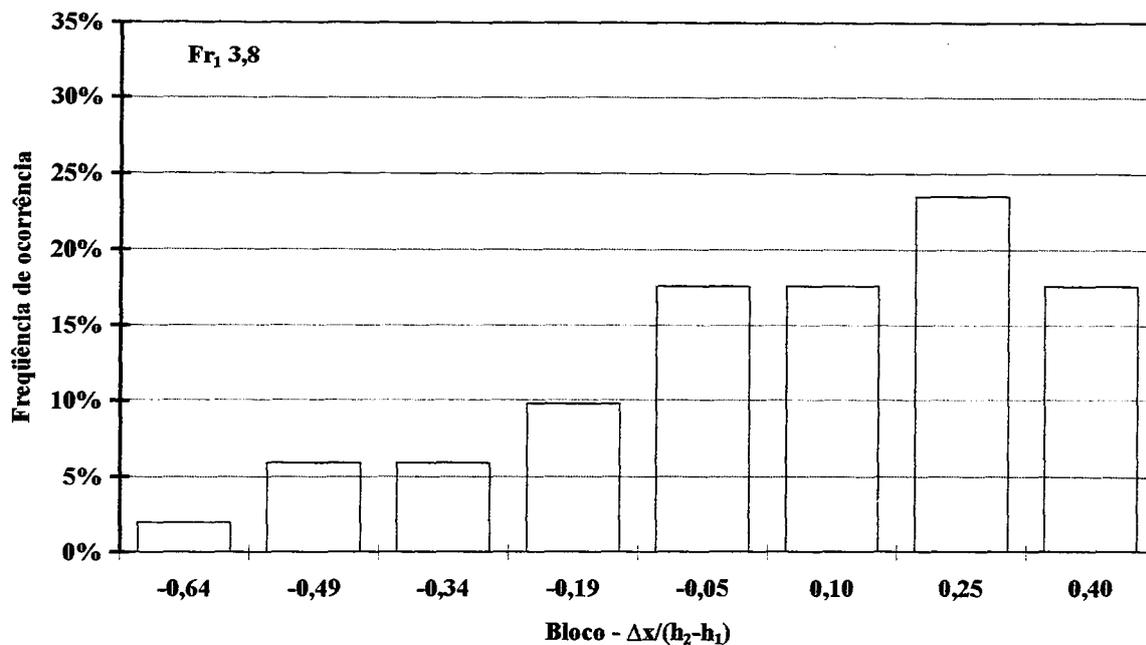


Figura 8.11 - Histograma de frequências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para o número de Froude 3,8.

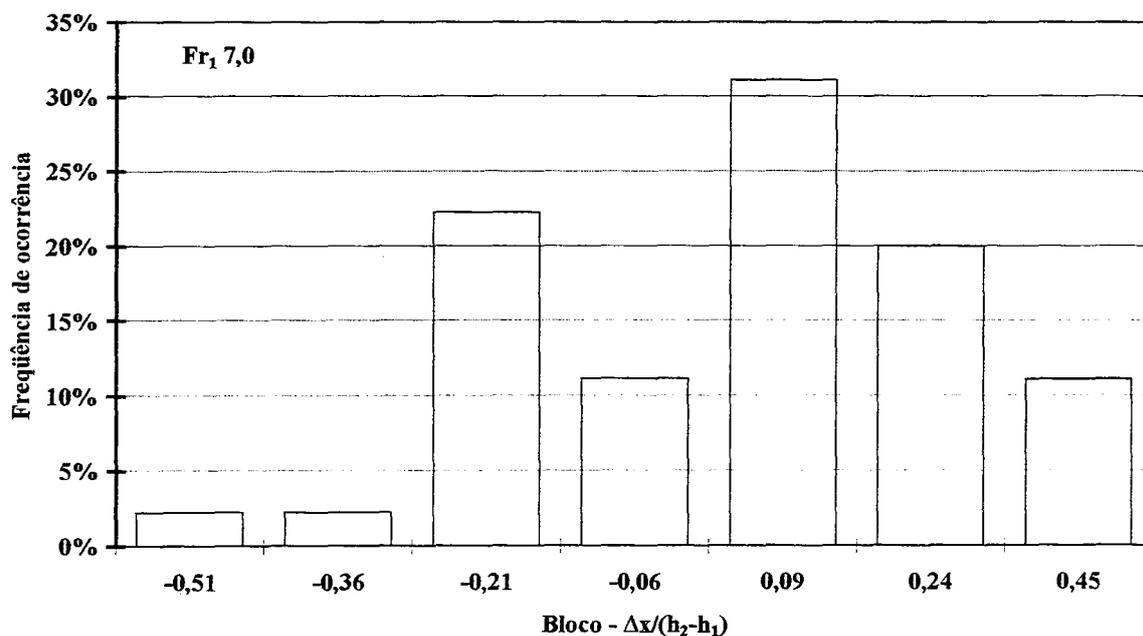


Figura 8.12 - Histograma de frequências de ocorrência para variação da posição inicial do ressalto para o número de Froude 7,0.

Para os números de Froude 2,9 e 3,8, a tendência e o formato do histograma segue um padrão como apresentado na Figura 8.9. Para o número de Froude 7,0 esta tendência difere pela existência de um pico de ocorrência antes do valor médio que altera o valor do

coeficiente de assimetria (Tabela 8.2). A causa não é conhecida, mas como sugerido anteriormente, uma análise nos parâmetros amostrais deve ser feita.

Observando a Tabela 8.2 constatou-se que a adimensionalização aqui adotada mostrou-se mais eficiente na uniformização dos resultados para a análise estatística dos dados do que a adotada por Long et al. (1991). O desvio padrão e os coeficientes de assimetria e curtose permaneceram seguindo uma mesma tendência.

Tabela 8.2 - Características estatísticas da variação da posição relativa $[\Delta x/(h_2-h_1)]$ de início do ressalto em função do número de Froude e média zero.

<i>n° de Froude</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Coef. de Assimetria</i>	<i>Coef. de Curtose</i>
<i>2,9</i>	<i>0,31</i>	<i>-0,50</i>	<i>-0,56</i>
<i>3,8</i>	<i>0,27</i>	<i>-0,62</i>	<i>-0,33</i>
<i>7</i>	<i>0,23</i>	<i>-0,18</i>	<i>-0,65</i>

Conclui-se, então, pelos resultados apresentados, que a variação da posição inicial do ressalto não parece seguir uma distribuição normal, pois, os coeficientes de assimetria e de curtose diferem consideravelmente, dos valores zero e três desta distribuição, respectivamente.

8.7.2 Propagação de ondas para jusante

O estudo da propagação de ondas para jusante tem como aplicação prática o auxílio no dimensionamento de muros laterais e para proteção de taludes a jusante da dissipação de energia em canais. A partir das diversas medidas das alturas conjugadas lentas foram apresentadas, em relação ao tempo, as amplitudes de ondas que se propagam após a influência do ressalto.

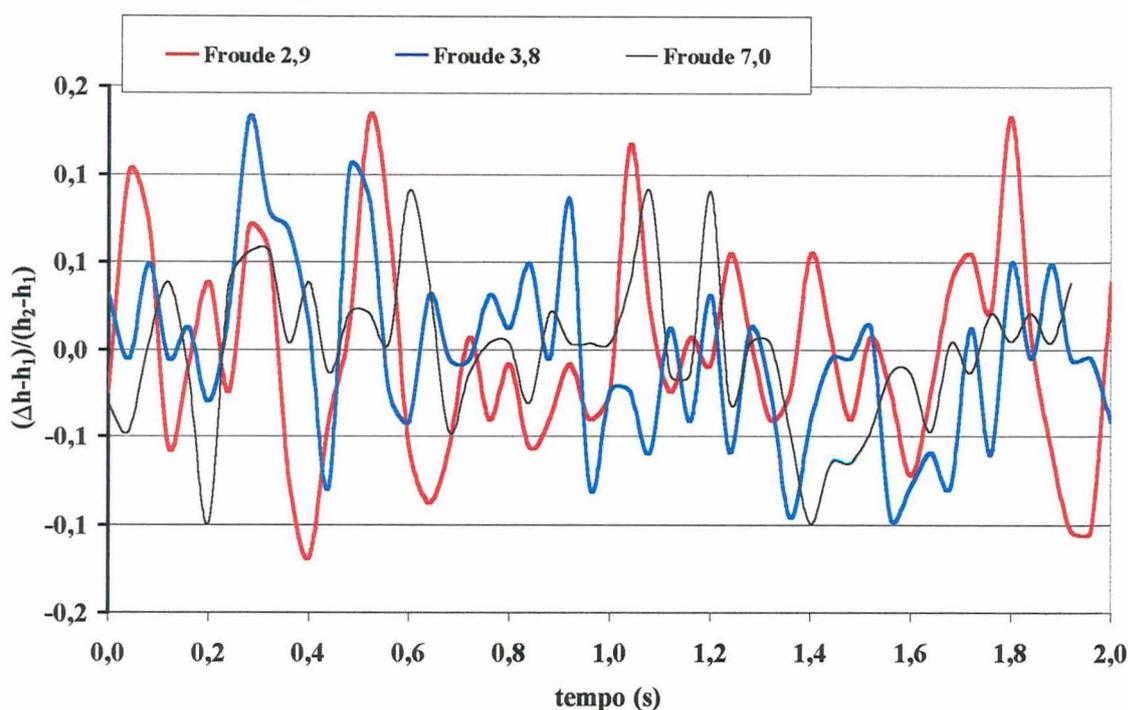


Figura 8.13 - Amplitude de ondas que se propagam a jusante da dissipação de energia em função do número de Froude.

Observando a Figura 8.13, pode-se distinguir os tipos de ressaltos ensaiados (classificação sugerida por Peterka, 1974). Existem várias classificações apresentada por diversos autores como Chow (1959) e French (1987) com relação aos tipos de ressalto e o número de Froude e é importante salientar esta classificação quando se analisa dados provenientes de ressaltos hidráulicos. Segundo Peterka (1974), um ressalto oscilatório possui maior perturbação junto à superfície da linha de água, diferentemente de um ressalto denominado estável onde esta variação diminui consideravelmente. Analisando a Figura 8.13 pode-se reforçar que, para números de Froude entre 2,9 e 3,8, o ressalto é do tipo oscilatório e, para o número de Froude 7,0, é do tipo estável. A amplitude esperada para números de Froude 2,9 e 3,8 é necessariamente maior, devido ao tipo de ressalto ensaiado.

A Tabela 8.3 apresenta o desvio padrão, assimetria e curtose para os dados apresentados na Figura 8.13. Mais uma vez pode-se considerar que o desvio padrão permaneceu praticamente constante. Os coeficientes de assimetria e curtose mudaram de tendência para o número de Froude igual a 7,0. Isso se explica, já que o tipo de ressalto ensaiado é diferente, sendo oscilatório para os dois primeiros e estável para o último.

Tabela 8.3 - Estatística descritiva das ondas que se propagam para jusante para diferentes números de Froude.

<i>n</i> ^o . de Froude	Desvio padrão	Coef. de Assimetria	Coef. de Curtose
2,9	0,06	0,42	-0,08
3,8	0,05	0,30	-0,10
7,0	0,04	-0,06	0,45

Observando a Figura 8.14 que apresenta a posição da crista da onda a jusante do ressalto pode-se visualizar que:

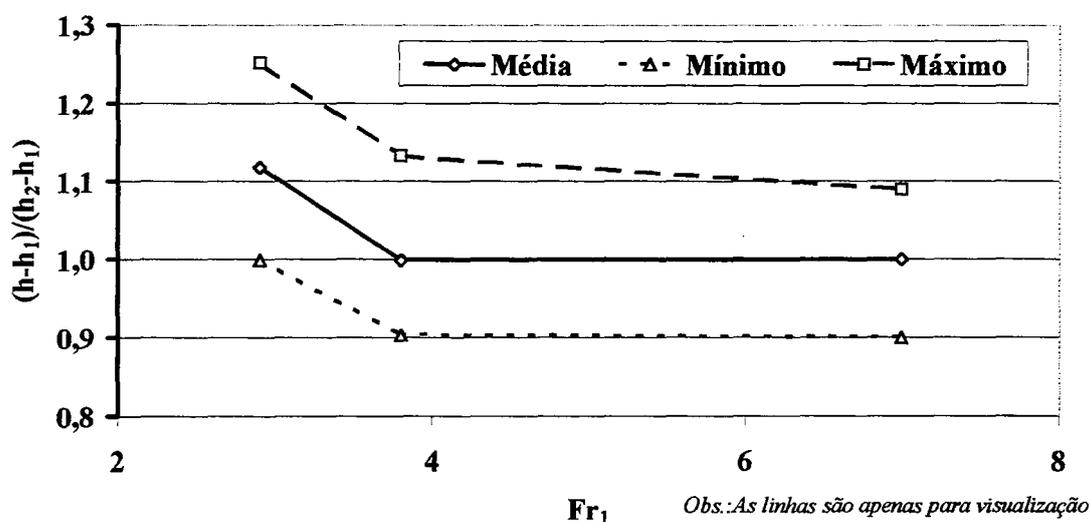


Figura 8.14 - Posição da crista da onda a jusante do ressalto em função do número de Froude.

Pela Figura 8.14, observa-se mais uma vez a importância de se enquadrar o ressalto ensaiado ao seu tipo de classificação. Os valores médios das amplitudes das ondas encontrados já eram esperados, inclusive a discrepância para o número de Froude 2,9. A explicação deste resultado foi mencionada no item *Considerações para a obtenção das características externas e internas do ressalto hidráulico*, a qual se refere ao tipo de ressalto.

Os valores máximos de amplitudes de ondas possibilitam estabelecer critérios de dimensionamento para muros de proteção laterais em canais. Tendo em vista a classificação proposta por Peterka (1974), pode-se observar que, para valores de número de Froude entre 2,5 e 4,5, o ressalto produz ondas de amplitudes maiores do que em um ressalto do tipo estável com número de Froude igual 7,0.

Após diversas análises do fenômeno anteriormente descrito, confirmou-se que a produção de ondas a jusante provém da dissipação de turbilhões, portanto, qualquer simulação desta deve caracterizá-lo como um escoamento rotacional.

8.7.3 Posições de início e fim do ressalto e do rolo - Comparações

Neste item serão analisadas as seguintes macrocaracterísticas do rolo e do ressalto:

- início do ressalto;
- comprimento e final do rolo; e
- fim do ressalto.

Optou-se por uma adimensionalização onde as quatro características poderiam ser analisadas conjuntamente em função do tempo, ou seja, todos os valores são relativos à média (igual a zero) da posição ou do tamanho, conforme o caso, representando apenas um Δx de variação.

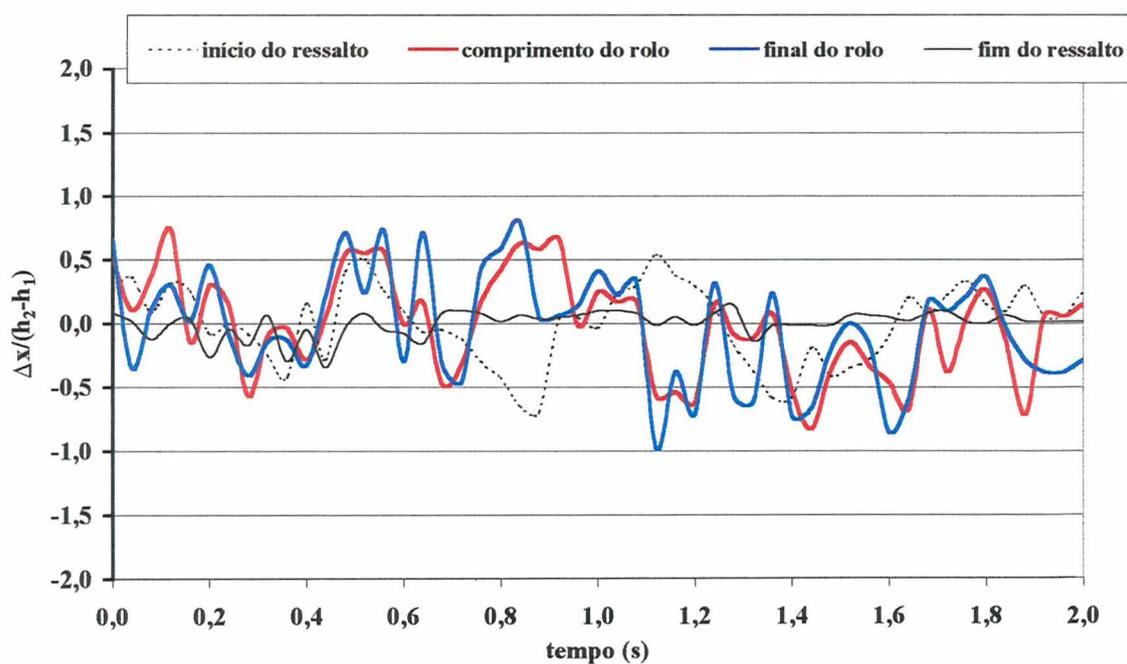


Figura 8.15 - Variação da posição ao longo do comprimento do canal e do tempo para número de Froude 2,9.

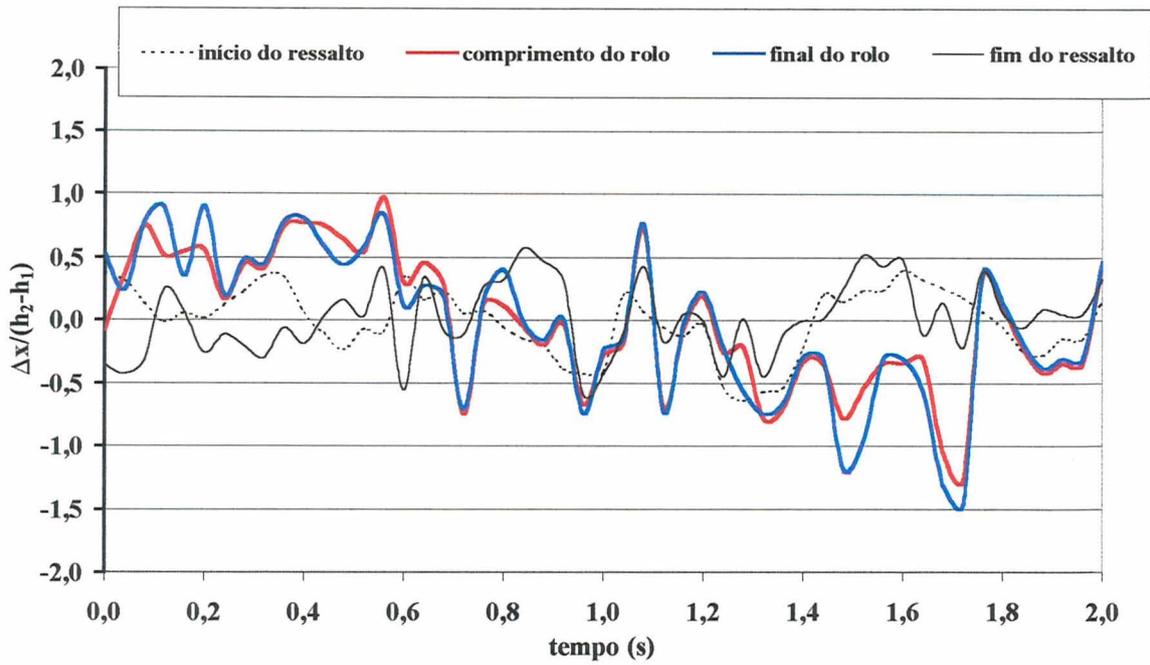


Figura 8.16 - Variação da posição ao longo do comprimento do canal e do tempo para número de Froude 3,8.

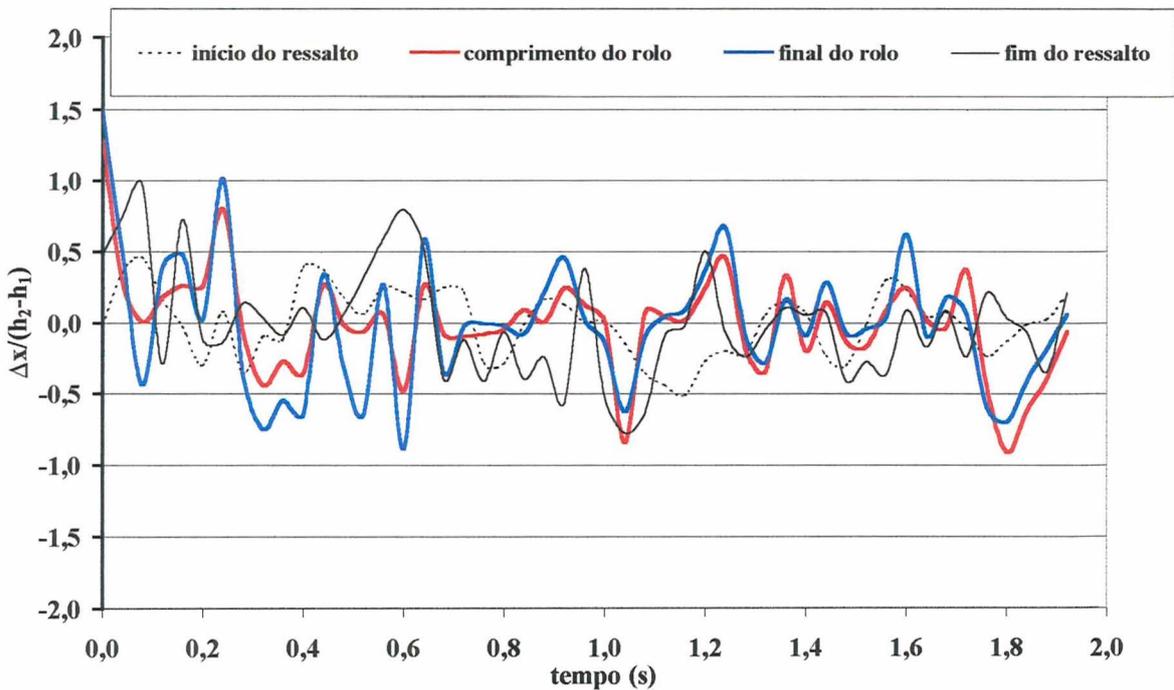


Figura 8.17 - Variação da posição ao longo do comprimento do canal e do tempo para número de Froude 7.

Pode-se verificar a ocorrência de um padrão, já mencionado por Long et al. (1991) no comportamento das características apresentadas. Quando se observa a variação da posição de

início do ressalto em relação ao comprimento do rolo, nota-se que, quando as curvas apresentam tendências semelhantes, encontram-se com maior número de turbilhões, não necessariamente o maior comprimento. Por outro lado, quando as curvas apresentam tendências opostas é possível associá-los a métodos de acoplamentos entre turbilhões. Como as curvas permanecem por mais tempo com tendências opostas, entende-se que os processos de acoplamentos entre turbilhões são predominantes e importantes no processo de dissipação de energia. Outra importante conclusão diz respeito às variações encontradas no fenômeno. À medida que o número de Froude aumenta as variações absolutas das características apresentadas também aumentam.

Pode-se observar pela análise das Figura 8.15, Figura 8.16 e Figura 8.17 que o comportamento do comprimento e do final do rolo são semelhantes, como era esperado em função das definições aplicadas aos dois.

Outro comportamento importante a mencionar é a tendência da variação entre o início e o final do ressalto. Ambos seguem uma tendência semelhante no sentido de manter sempre o mesmo comprimento.

Tabela 8.4 – Estatística descritiva da variação da posição relativa $[\Delta x/(h_2-h_1)]$ longitudinal do comprimento do rolo, fim do rolo e fim do ressalto.

<i>n^o. de Froude</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Coef. de Assimetria</i>	<i>Coef. de Curtose</i>
<i>Comprimento do rolo</i>			
2,9	0,40	-0,12	-0,75
3,8	0,53	-0,20	-0,66
7,0	0,37	0,41	2,86
<i>Final do rolo</i>			
2,9	0,45	-0,04	-0,73
3,8	0,59	-0,44	-0,35
7,0	0,47	0,60	1,21
<i>Comprimento do ressalto</i>			
2,9	-	-	-
3,8	0,30	-0,04	-0,72
7,0	0,38	0,53	0,12

Para completar a análise, a Tabela 8.4 apresenta os valores do desvio padrão, coeficiente de assimetria e de curtose. Os valores de comprimento do ressalto para o número de Froude 2,9 não puderam ser determinados devido ao tamanho do ressalto ser maior que o

tamanho da janela, mas observa-se que todas as estatísticas seguem um comportamento semelhante. O desvio padrão apresentou-se praticamente constante.

8.7.4 Comparações entre as linhas de água da superfície

8.7.4.1 Valores médios da linha de água da superfície nos pontos do final e comprimento do rolo

Segundo a literatura consultada, o conteúdo deste item trata de um ponto interessante e que merece discussão. Diversos autores (Rajaratnam, 1967; Hager, 1992) afirmam que a profundidade no final do rolo é igual a 95% da altura lenta do ressalto. Mais uma vez a questão de como foi obtido este resultado é levantada. Pela definição aqui apresentada e a técnica utilizada foi possível constatar que esta afirmação não foi confirmada. Pelas imagens analisadas, foi identificado um padrão onde a profundidade no final do rolo e comprimento do rolo são maiores que a altura lenta do ressalto. Este fato se deve à grande flutuação da superfície (que será mostrada em item posterior) além dos pontos final e comprimento do rolo resultarem do ponto de descolamento da camada limite junto ao fundo do canal. Na Figura 8.18 são apresentados os resultados obtidos do final do rolo em relação ao número de Froude. Observa-se que há uma tendência da relação adimensional apresentar um valor médio da ordem de 1,06. Mais uma vez é importante a classificação do tipo de ressalto ensaiado para a análise dos resultados.

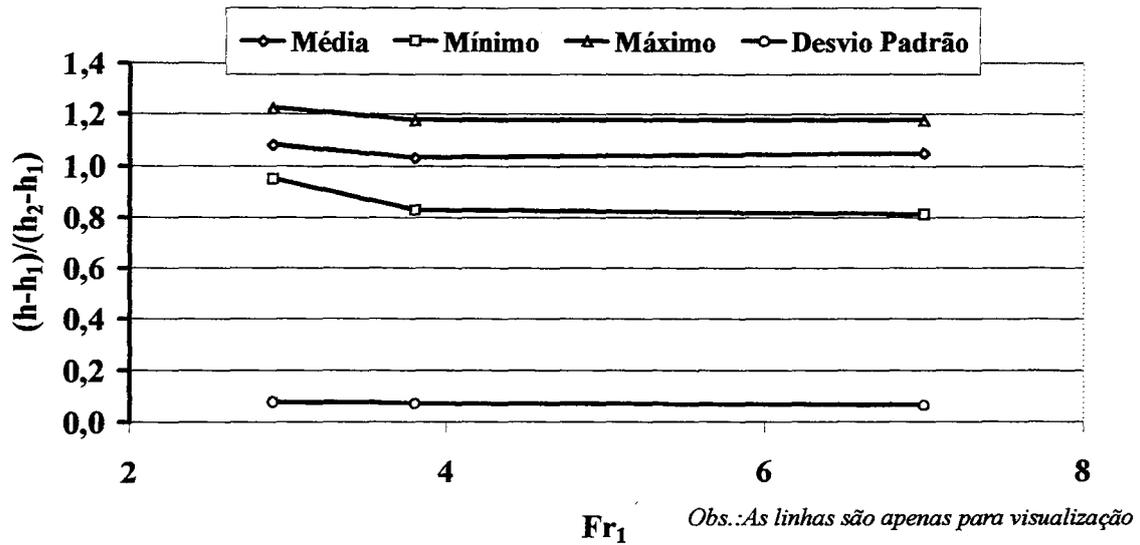


Figura 8.18 - Profundidade do escoamento no final do rolo para diferentes números de Froude.

8.7.4.2 Análise sobre a flutuação da linha de água na superfície

O processo de estiramento e contração do resalto (e turbilhões) causado pelo processo de acoplamento de turbilhões faz com que a linha de água da superfície seja muito instável, propiciando a formação e quebra de ondas que se propagam para montante, servindo para a reposição de material (ar + água) para formação de novos turbilhões, sendo um processo interativo.

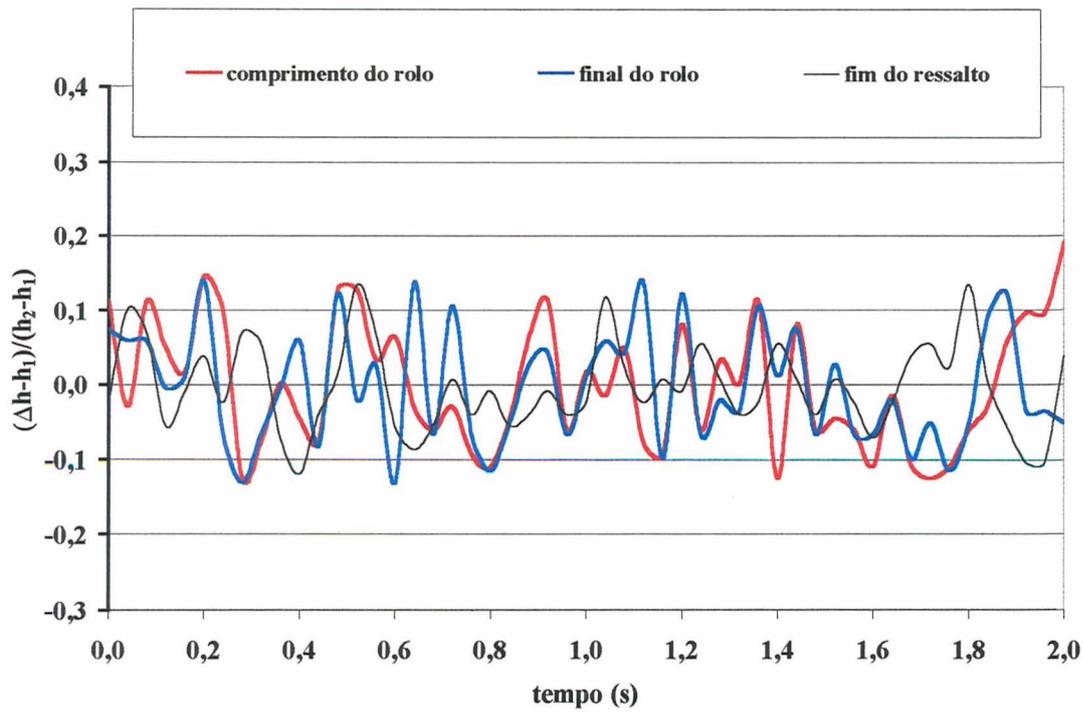


Figura 8.19 - Análise da variação da linha de água da superfície do ressalto ao longo do tempo nas seguintes posições longitudinais: comprimento e final do rolo e fim do ressalto, para Froude 2,9.

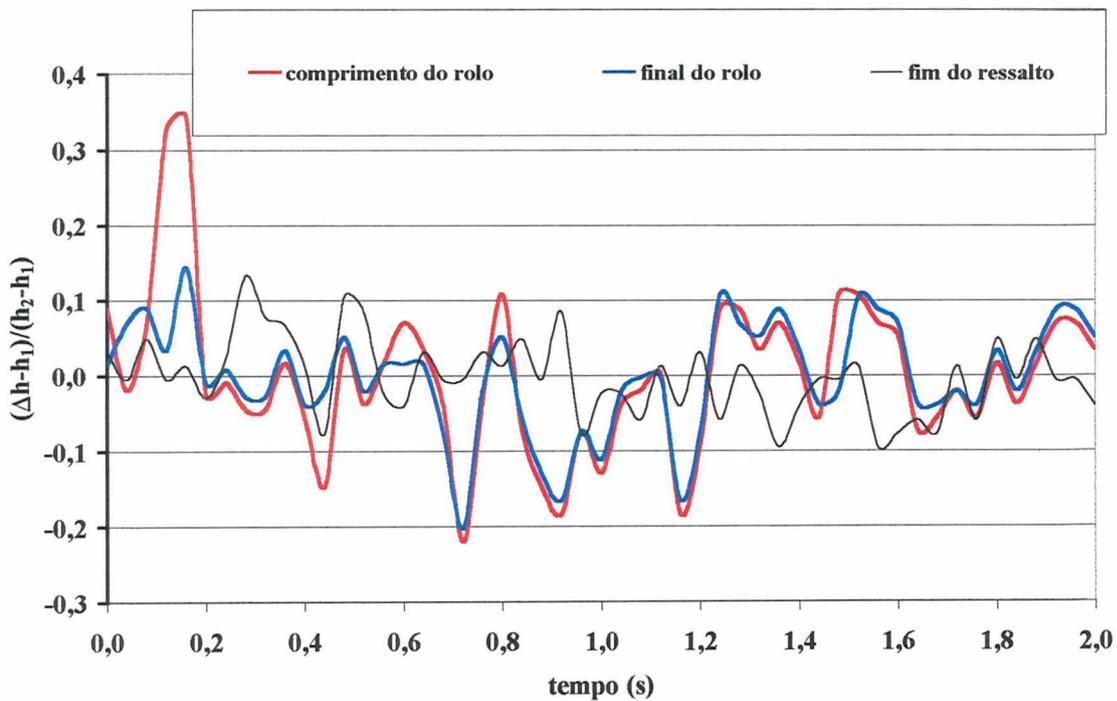


Figura 8.20 – Análise da variação da linha de água da superfície do ressalto ao longo do tempo nas seguintes posições longitudinais: comprimento e final do rolo e fim do ressalto, para Froude 3,8.

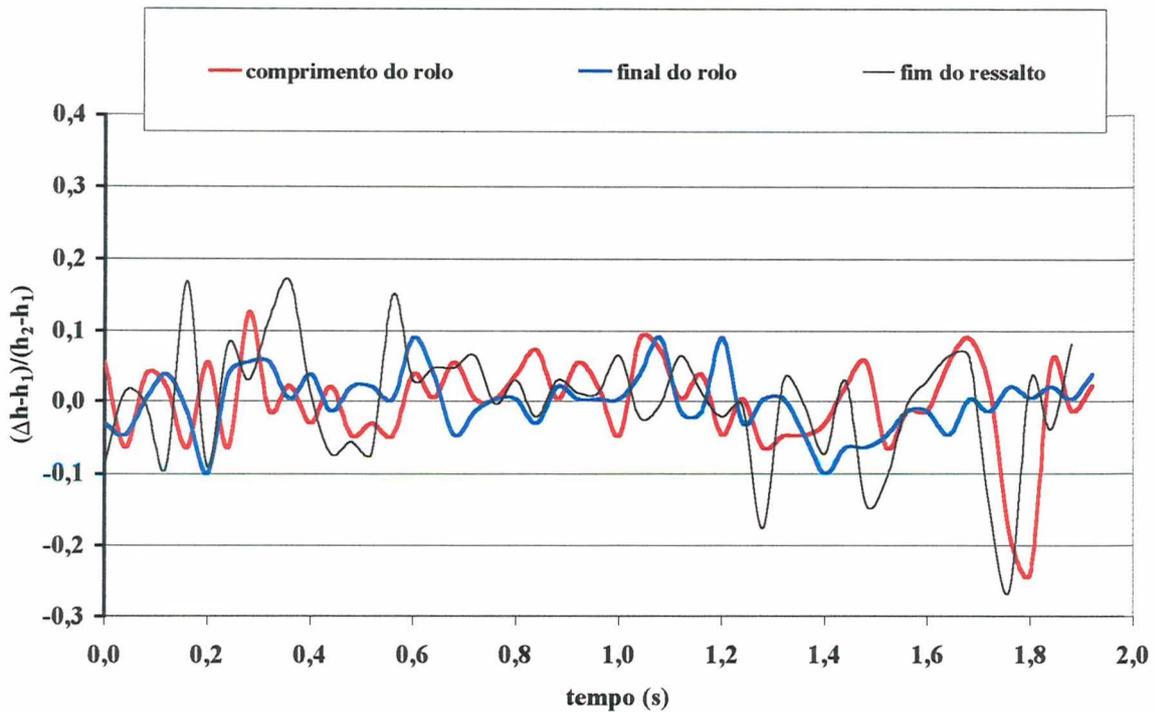


Figura 8.21 - Análise da variação da linha de água da superfície do ressalto ao longo do tempo nas seguintes posições longitudinais: comprimento e final do rolo e fim do ressalto, para Froude 7,0

A Tabela 8.5 apresenta as características estatísticas que descrevem a variação da linha de água da superfície na posição longitudinal do comprimento e final do rolo. Conforme constatado anteriormente o desvio padrão permaneceu constante, mas os demais coeficientes são ainda mais sensíveis que as variação das características de posição.

Tabela 8.5 – Estatística descritiva da variação relativa $[(\Delta h - h_1)/(h_2 - h_1)]$ da linha de água da superfície no comprimento e final do rolo.

<i>n° . de Froude</i>	<i>Desvio padrão</i>	<i>Coef. de Assimetria</i>	<i>Coef. de Curtose</i>
Comprimento do rolo			
2,9	0,09	0,30	-1,05
3,8	0,08	0,28	-1,02
7,0	0,08	-0,62	1,27
Final do rolo			
2,9	0,07	-0,62	0,48
3,8	0,10	0,87	2,80
7,0	0,07	-1,27	3,38

8.7.4.3 Análise das variações ao longo do ressalto

Neste item será mostrado o desenvolvimento da linha de água da superfície, do processo dos turbilhões e conseqüentemente do rolo, fornecendo, de forma específica ou geral, parâmetros importantes para o desenvolvimento de critérios de dimensionamento de estruturas de dissipação por ressalto hidráulico.

Devido à dificuldade de visualização das 50 imagens analisadas em uma única figura, optou-se pela ilustração de trechos dessa análise, visando maior clareza no entendimento dos resultados. Para tal, gráficos com 10 imagens sucessivas serão apresentados a seguir, para cada número de Froude ensaiado.

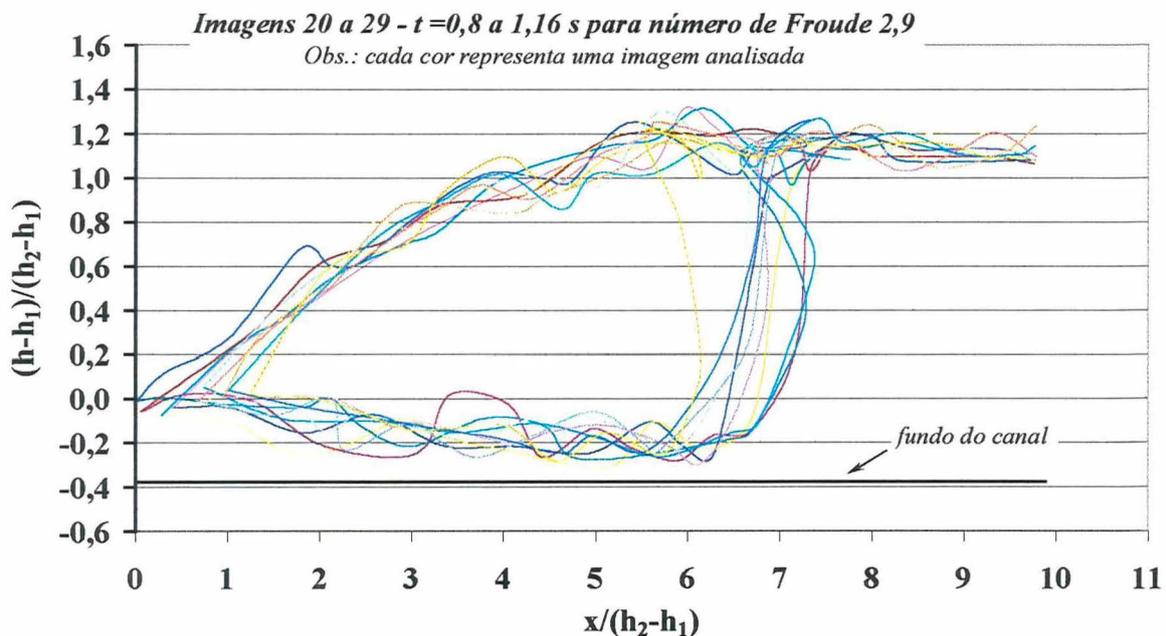


Figura 8.22 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 2,9.

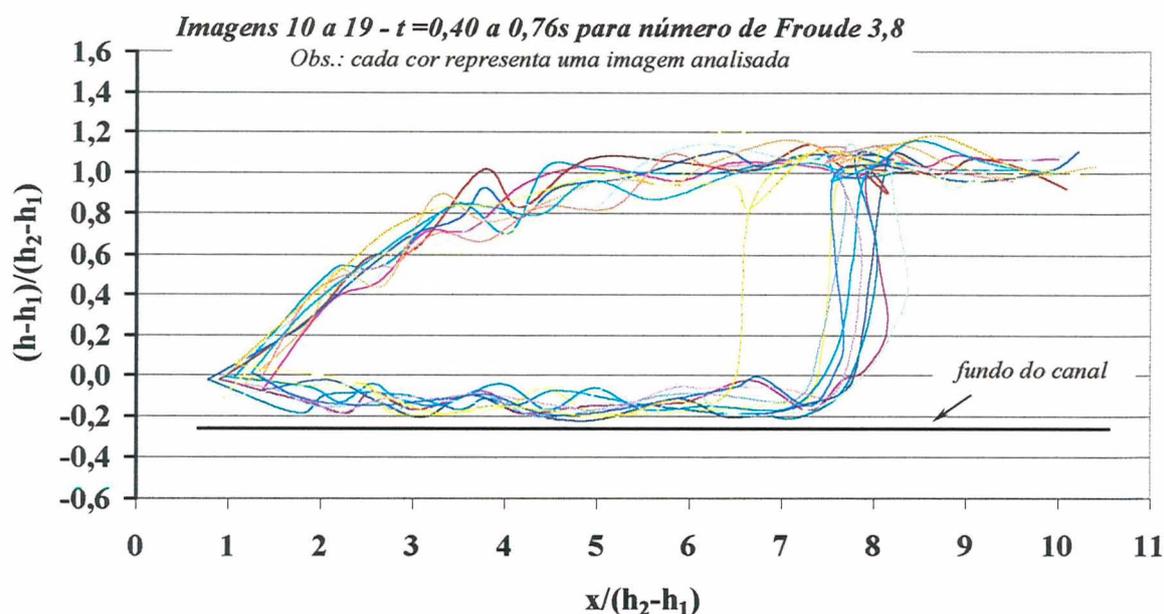


Figura 8.23 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude $3,8$.

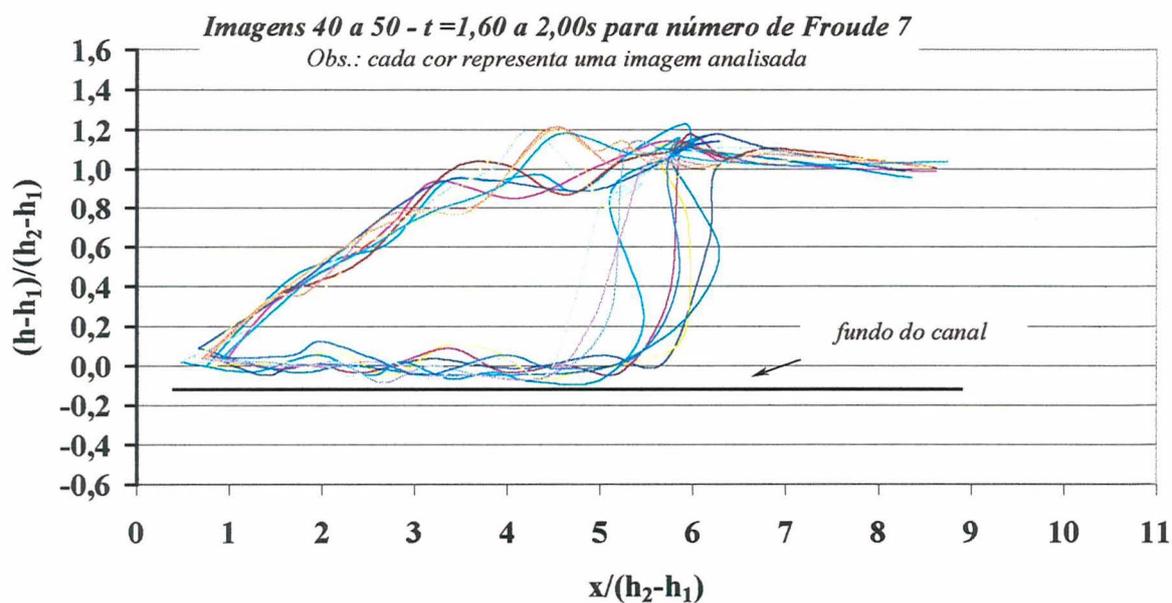


Figura 8.24 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude $7,0$.

Com as figuras anteriores e demais imagens analisadas pode-se verificar tendências nas seguintes posições ($x/(h_2-h_1)$) para os números de Froude $2,9$; $3,8$ e $7,0$ respectivamente:

- maior flutuação na linha de água da superfície para as posições 2 a 4 e 5 ;

- dos turbilhões encostar junto ao fundo nas posições 2,5 a 6 com especial atenção para 3, 4 e 5, propiciando pontos de maior probabilidade de ocorrência de cavitação na bacia.

Foi também observado um padrão em que, à medida que as flutuações da superfície tendem a diminuir, as flutuações do perfil inferior do rolo tendem a aumentar.

Outra importante constatação dessa técnica de visualização é a tendência de diminuição do núcleo potencial (escoamento não perturbado ou não aerado) já mencionada por Schröder (1963) apud Rajaratnam (1967). Uma sugestão para abordagem de todas as questões anteriormente citadas é mostrada na Figura 8.25 que além de proporcionar a visualização de características médias, serve como indicador da ordem de grandeza das características oscilatórias do ressalto na faixa de número de Froude entre 2,9 e 7,0.

A Figura 8.25 além de apresentar os pontos medidos para os três números de Froude, sugere duas curvas: a) uma curva média que delimita o escoamento aerado do não aerado que pode vir a auxiliar na determinação da concentração de ar ao longo do ressalto; e b) uma curva média do perfil longitudinal da linha de água do ressalto que pode auxiliar no dimensionamento das estruturas.

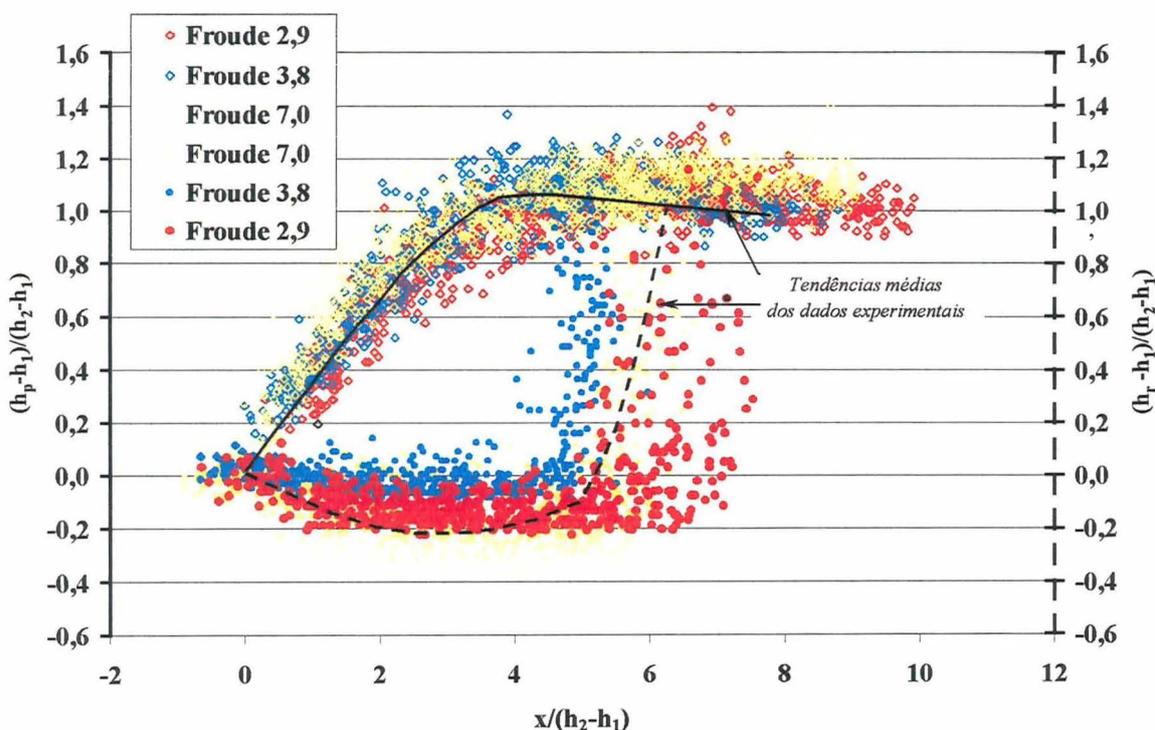


Figura 8.25 – Profundidades medidas da linha de água da superfície (h_p) [\diamond] e do núcleo potencial (h_r) [\bullet] ao longo do ressalto para todos os números de Froude e tendência média dos dados experimentais.

8.7.4.4 Turbilhões – Posição e Tamanhos

A metodologia utilizada para identificação e análise dos turbilhões apresentou-se, diferentemente do esperado quando do início da pesquisa, ineficiente para determinação da velocidade de propagação do turbilhão no interior do rolo, contudo foi possível determinar suas dimensões em relação à posição no interior do ressalto. A metodologia consistia em analisar imagens sucessivas, desde a formação de um turbilhão até sua dissipação, medir coordenadas do centro (referenciadas a um ponto fixo a montante do ressalto) e seu tamanho L_y na vertical. Como observado por Long et al. (1991) e confirmado visualmente no decorrer dos trabalhos aqui realizados, o tamanho do turbilhão na direção longitudinal é sempre maior do que na vertical, dependendo da posição longitudinal no ressalto. Deve-se frisar que o maior turbilhão é sempre localizado no final do rolo, podendo existir turbilhões em fase de dissipação após o rolo.

A metodologia para determinação da velocidade dos turbilhões mostrou-se ineficiente devido a não tratar o problema de estiramento na direção longitudinal ao escoamento do turbilhão, como também, o processo de acoplamento entre turbilhões vizinhos.

Observa-se, também, que a posição do centro do turbilhão possui grande variação (Figura 8.26) crescendo à medida que se propaga para jusante. Uma importante informação, que se pode extrair dos dados apresentados, é que os turbilhões, à medida que crescem, possuem como característica um comprimento vertical da ordem da profundidade do perfil médio longitudinal do ressalto (Figura 8.27), como também apresentado por Long et al. (1991).

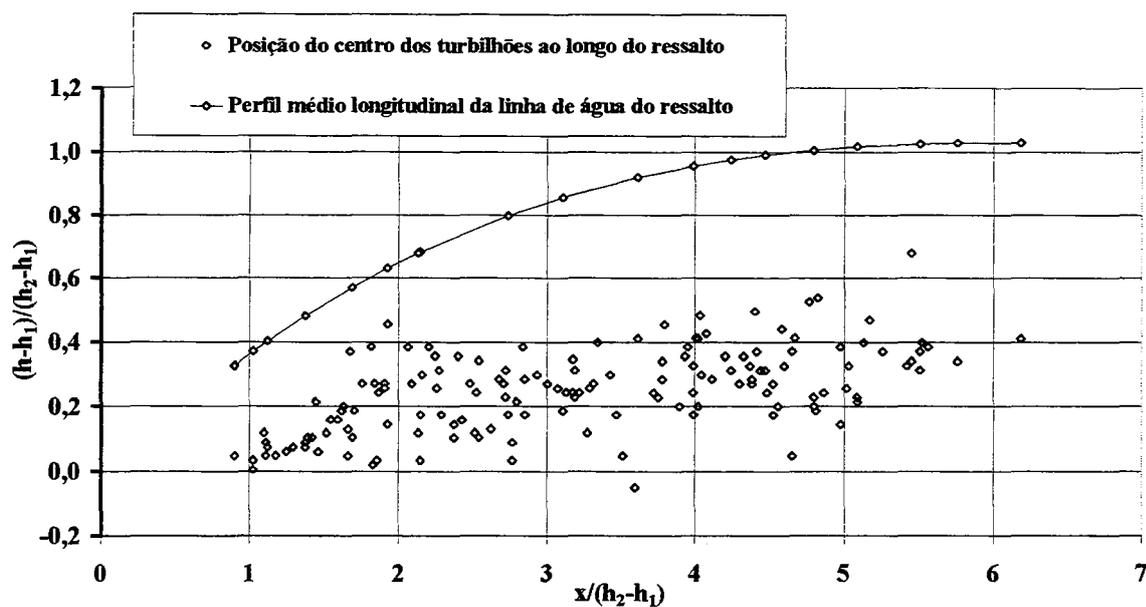


Figura 8.26 - Posição do centro de 9 turbilhões sucessivos com intervalo de tempo de 0,04 s para número de Froude 2,9.

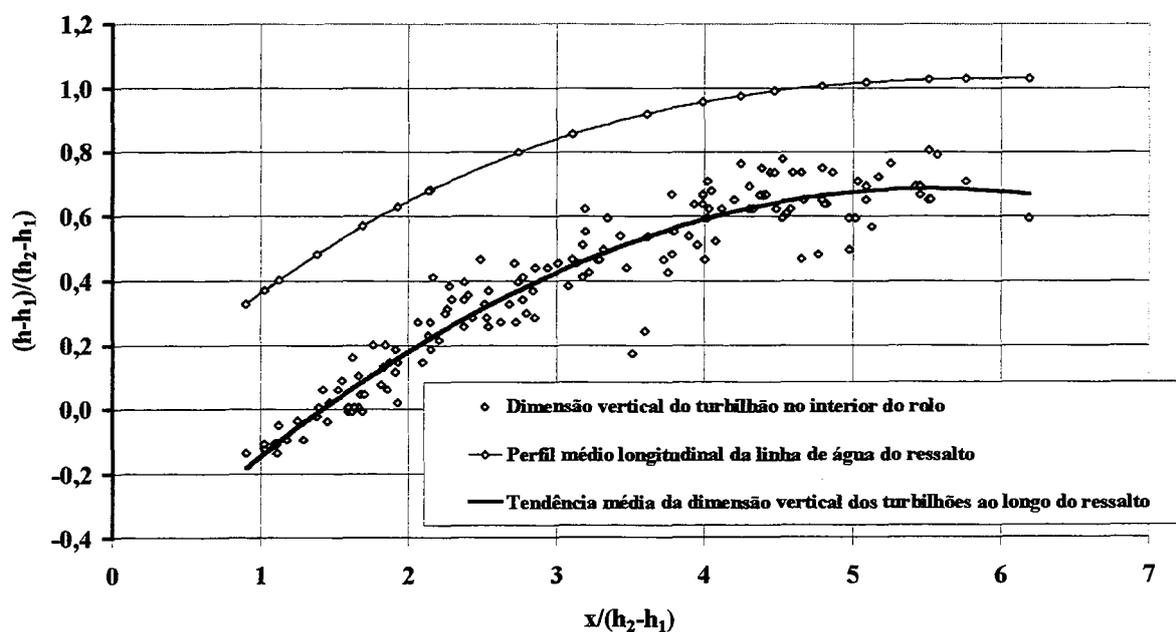


Figura 8.27 - Dimensão vertical de 9 turbilhões sucessivos espaçados no tempo de 0,04 s para número de Froude 2,9.

Os resultados apresentados nesta Figura 8.27 são referentes apenas ao número de Froude 2,9 em vez que não foi possível a determinação e análise para os demais devido aos

pequenos tirantes de água no escoamento refletirem muita intensidade de luz, dificultando a identificação dos turbilhões. Estes resultados serve como auxílio a futuras metodologias para obtenção dessas características.

8.8 *Análise de Erros*

Visando a quantificação dos erros cometidos no processo de medição efetuado sobre as imagens foram utilizados objetos de diversos tamanhos, todos com a mesma ordem de grandeza dos tirantes de água obtidos junto à janela de vidro, comparando-os com sua verdadeira grandeza. Estes eram medidos segundo o mesmo procedimento adotado pela técnica de visualização e, tomando o erro máximo absoluto para comparar com a menor e a maior medida que foram obtidas nos ensaios, chegou-se a valores variando entre 2,5% e 40%. A situação onde ocorre o erro de 40 % é extrema, excepcional e eventual. Caso ocorra, esse erro acontece quando o tirante de água, normal ao fundo do canal é muito pequeno, ocorrendo em pequenas faixas como onde os turbilhões encostam junto ao fundo. À medida que os tirantes são obtidos, o erro dilui-se, não representando no conjunto de imagens analisadas, uma fonte significativa. Para determinação da linha de água da superfície este erro varia ao longo do comprimento do ressalto, sendo maior no início e menor no final. As diferenças máximas entre estes valores chegaram a atingir 0,7 cm, quando a distância da câmera à seção de ensaio do canal era de 2,0 m.

A duas maiores fontes de erros identificadas foram:

- Pequenos tirantes de água no escoamento geram erros relativos maiores;
- No processo de calibração de medidas com o programa *Image Tool* o erro máximo absoluto é pequeno em relação à medida adotada como padrão. Isso leva a uma propagação de erro para pequenas medidas de tirantes de água; e
- Apesar destas limitações conseguiu-se, para determinação de alturas conjugadas lentas, uma discrepância da ordem de apenas 2,5% das obtidas teoricamente. Isto reforça o item anterior sugerindo calibrações diferentes para faixas de valores a serem obtidos pelo programa *Image Tool*.

9 Conclusões

Ratificando as palavras de Mossa e Tolve (1998), “a evolução tecnológica na área de visualização de escoamentos, juntamente com o desenvolvimento de componentes eletrônicos para o processamento de sinais de vídeo, promoveram um aumento significativo das ferramentas utilizadas na análise dos fenômenos, diminuindo os custo de implementação”, conseguiu-se atingir os objetivos do trabalho, acrescentando importantes informações para compreensão do ressalto hidráulico.

A técnica de visualização, aqui apresentada, mostrou-se eficaz para determinar os níveis de água médios e instantâneos no ressalto, delineando comportamento, padrões do rolo e, apresentando ainda algumas características referentes aos turbilhões. Foi possível, também, fornecer parâmetros sobre a variabilidade das macrocaracterísticas do ressalto, auxiliando na formulação de critérios para dimensionamento de estruturas de dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de comportas.

Neste capítulo também serão apresentadas algumas limitações referentes à técnica utilizada e nas instalações do laboratório.

9.1 *Técnica de Visualização*

As conclusões a respeito da técnica de visualização estão vinculadas à análise de eficiência da iluminação utilizada, a possibilidade de obter medidas com erros satisfatórios, desenvolvimento das características externas e internas do ressalto ao longo do tempo, além de diminuir os custos de implantação relativos a outras técnicas aplicada ao ressalto hidráulico.

Diversos ensaios foram realizados para determinação da intensidade e o tipo de fonte luminosa a ser utilizada. Chegou-se, como descrito na Metodologia de ensaio, a um padrão que possibilitou, com o decorrer do trabalho, delimitar a melhor opção para determinação das características do ressalto.

As várias opções de iluminação possibilitaram encontrar soluções para diversos problemas que aparecem no decorrer do trabalho. Conclui-se então:

- A iluminação mais adequada para o fenômeno seria a que produzisse uma luz artificial com faixa de temperatura de 4000 K a 6500 K. Esta faixa representaria, para condições naturais de iluminação, até 2 horas após o nascer do sol ou 2 horas antes do por-do-sol, e, luz do sol ao meio dia respectivamente. Nestas condições qualquer câmera de vídeo do tipo doméstica possui ajuste automático. Mas, quando foram utilizadas fontes de luz que emitiam temperaturas maiores (3500 K), obteve-se melhores resultados para as imagens tratadas, caminhando assim para uma conclusão dessa natureza;
- Para tentar contornar o problema acima, a câmera de vídeo possui uma configuração de ajuste de balanço para iluminação externa (*White Balance Switch*) posicionada em *Indoor*;
- A iluminação utilizada deve objetivar a otimização da visualização do fenômeno analisado. Para identificação dos turbilhões mostrou-se eficiente um nível de iluminação de 3000 LUX juntamente com uma baixa velocidade de obturação (1/100 no mínimo) da câmera utilizada. Para fins de obtenção dos contornos no ressalto, aqui apresentados, o nível de iluminação de 5500 LUX atendeu perfeitamente esses objetivos. Estes valores mostraram-se eficientes e compatíveis com as condições de luminosidade e das instalações onde o ressalto foi ensaiado. É recomendável, como dito antes, a realização de ensaios prévios para determinação destes valores de intensidade luminosas, ficando aqui um padrão de iluminação de referência;
- Apesar da placa de captura de vídeo apresentar-se ineficiente para aquisição de imagens a uma taxa superior de 25 quadros por segundo, foi possível identificar as macrocaracterísticas médias e instantâneas do ressalto;
- O método utilizado para calibração de medidas no programa de tratamento de imagens *Image Tool*, acarretou erros máximos que variam entre 2,5% a 40% (maior e menor tirante respectivamente), sendo que o erro máximo fica restrito a pequenas faixas de medição com tirantes de água pequenos. O erro permaneceu praticamente constante ao longo do ressalto, na ordem máxima de 0,7 cm. À medida que os valores dos tirantes eram obtidos, esse erro diluía-se, não interferindo significativamente nos resultados apresentados. É sugestão, no intuito de minimizar esses erros, que sejam feitas diversas calibrações respeitando faixas de tirantes de água. Ou seja, para pequenos tirantes devem ser usados padrões pequenos, com mesma ordem de grandeza, fixados junto ao canal. Esse procedimento diminuiria o erro causado pela calibração métrica com apenas uma medida padrão. Esta sugestão partiu da análise dos erros e dos resultados obtidos da metodologia

proposta neste trabalho e por isso não foi utilizada. Esta acarretará um trabalho maior na análise dos dados, mas possibilitará erros menores.

É importante frisar que a técnica de visualização proposta, já anteriormente utilizada por outros autores com algumas adaptações técnicas, mostrou-se bastante econômica. Seu custo de implantação é aproximadamente 10 vezes menor do que a empregada por Long et al. (1991), diferindo apenas nos equipamentos utilizados e, apresentando resultados semelhantes.

Em geral, as técnicas de visualização requerem do pesquisador um conhecimento prévio do fenômeno, como também, grande trabalho laboratorial prévio e sensibilidade para obter dados confiáveis provenientes de seus respectivos estudos. Através da análise das imagens isoladas de um conjunto maior (filme), o autor deve preocupar-se em definir claramente seus objetivos e metodologia e respeitá-la até o final do trabalho. Com o advento do processo de digitalização de imagens, os pesquisadores ganharam muito na análise visual de fenômenos com grandes frequências características e turbulência, pois o fenômeno depois de digitalizado poderá ser observado por partes ou como um todo.

9.2 Características Oscilatórias e Médias do Ressalto Hidráulico

É necessário para descrição das características externas e internas do fenômeno uma classificação prévia do tipo de ressalto hidráulico ensaiado, como apresentada por Peterka (1974). Apesar de não ter sido feita comparação com sistemas reais, segundo a formulação teórica de Kindsvater não são esperados efeito de escala nos resultados apresentados, apesar das propostas de Hager e Bremen (1989) e Pinheiro (1995) a indicarem para um dos números de Froude ensaiado (Fr_1).

A metodologia mostrou-se eficiente e resultou na determinação de características médias e instantâneas do ressalto hidráulico. Pode-se então concluir:

- Os resultados de alturas conjugadas medidas mostraram-se compatíveis com o equacionamento teórico apresentado por Kindsvater (1944) apud Chow (1959). A diferença encontrada entre estes valores foi de 2,5%, provavelmente oriunda da técnica de visualização utilizada;
- O comprimento do ressalto, aqui definido como a distância desde o início do ressalto até o final da saída de bolhas de ar, é um critério mais conservador para dimensionamento de

estruturas de dissipação por ressalto do que aqueles adotados por Peterka, Elevatorski e outros, resultando valores maiores;

- Foi observado que a profundidade no final do rolo, em média, encontra-se entre 1,03 a 1,08 da altura conjugada lenta, diferentemente da literatura que apresenta como 0,95. Isso se deve a grandes flutuações da superfície do ressalto;
- A interpretação dos resultados das características oscilatórias no ressalto mostraram que o processo de acoplamento de turbilhões vizinhos é importante no fenômeno de dissipação de energia;
- Foi comprovada a relação entre as flutuações da linha de água da superfície com o processo de estiramento e contração do ressalto, causado pelo processo de acoplamento e movimentação dos turbilhões no ressalto hidráulico. Então, pode-se associar as flutuações da superfície às frequências dos dois processos acima mencionados, não colocando-os como totalmente aleatórios;
- Quanto à determinação de zonas ($\Delta x / (h_2 - h_1)$) para análise do projetista de obras hidráulicas, visando prever problemas como cavitação e fadiga nas lajes das bacias de dissipação:
 - as maiores flutuações da superfície são dadas para as posições iguais a 2 a 4 e 5, para os números de Froude 2,9; 3,8 e 7,0 respectivamente;
 - as posições em que o rolo encosta no fundo estão entre 2,5 a 6, com especial atenção em 3, 4 e 5, todos para os números de Froude 2,9; 3,8 e 7,0 respectivamente;
- A técnica utilizada para obtenção dos dados exige exaustivo trabalho computacional, o que limitou a possibilidade de análise de maiores tempo de imagens sucessivas. É recomendável a análise de intervalos de tempos maiores para que os resultados possam ser associados a frequências dominantes.

10 Recomendações

Este capítulo visa fornecer informações necessárias para aqueles que poderão dar continuidade a este trabalho e enfatizar, principalmente, a necessidade de ensaios prévios.

É importante salientar que a metodologia aqui adotada visa atender objetivos específicos de visualizar o escoamento macroturbulento do ressalto determinando as características externas e internas do mesmo. É possível que os padrões dos equipamentos utilizados e da iluminação não atinjam todos objetivos, ficando a cargo do pesquisador fazer suas modificações.

O processo de digitalização de imagens é a maior ferramenta utilizada nesse estudo e sua metodologia deve e pode ser aplicada de maneira geral ao método de visualização empregado.

10.1 Técnica de Visualização

As informações apresentadas sobre iluminações, digitalizações, padrões de funcionamento de equipamentos e metodologia de análise e tratamento das imagens foram obtidas em um conjunto de ensaios preliminares que permitiram auxiliar na determinação de uma metodologia clara e coerente com a proposta de estudo. A seguir apresentam-se comentários sobre os ensaios preliminares efetuados:

- Deve-se ter em mente a intensidade de luz utilizada no fenômeno. Por ser um escoamento bifásico o reflexo devido à refração da luz é natural e pode causar perda na qualidade das imagens adquiridas. Sugere-se níveis de iluminação menores que 9300 LUX;
- A câmera de vídeo deve possuir foco manual, pois o sistema de foco automático mostrou-se ineficiente em identificar a real distância dos objetos em meio líquido, permanecendo instável;
- O tempo de abertura do obturador deve, para visualização dos turbilhões, ser menor ou igual a 1/100 s. É bom lembrar que à medida em que a velocidade do fenômeno aumenta o tempo de abertura do obturador deve diminuir, caso contrário o resultado será uma

imagem “borrada”. Fica a critério do pesquisador analisar o problema tentando conciliar velocidade do fenômeno versus configuração da câmera utilizada;

- Para obter melhores resultados, a captura de vídeo deve ser, preferencialmente, feita em disco rígido de alto desempenho em separado, destinado somente à captura e edição, tal como uma configuração de disco rígido certificado para AV (audio – vídeo) com um drive SCSI (*Small Component Serial Interface*) 2, UltraSCSI ou Ultra DMA IDE ou um “array” de discos. A utilização de uma placa de captura de vídeo de qualidade se faz necessária.

10.2 Instalações

- As janelas de vidro utilizadas devem ser dimensionadas para o tamanho do fenômeno a ser ensaiado, como também, serem anti-reflexo;
- Nas instalações utilizadas deve-se, a montante da comporta, elevar os muros laterais, possibilitando maior flexibilidade no aumento da carga hidráulica. Com isso torna-se possível obter uma faixa maior de números de Froude, proporcionando maiores tirantes do escoamento para aplicação da técnica aqui empregada;
- O ambiente de ensaio deve estar tanto quanto possível livre de iluminação externa (solar) facilitando a aquisição de imagens livres de sombras.

10.3 Técnica de Medida para Retirada dos Dados

- À medida que diminuem os tirantes de água dentro do ressalto (aumento do número de Froude), os erros relativos na obtenção dos dados podem aumentar. Por esse motivo faz-se necessário o aumento da carga à montante da comporta;
- Não é recomendado utilizar a técnica de obtenção das coordenadas x e y do centro dos turbilhões para determinação da velocidade de propagação dos mesmos, pois esta técnica não leva em consideração o processo de estiramento e acoplamento dos turbilhões;
- É interessante extrair dados referentes ao perfil do ressalto até uma distância superior ao final do mesmo. Assim pode-se determinar com maior precisão os efeitos do ressalto a jusante; e

- É recomendado para futuros trabalhos a delimitação da zona de bolhas a jusante do rolo, caracterizando-a e determinando sua influência no fenômeno.

10.4 Fenômeno

- Como consequência da análise feita o autor sugere associar o ressalto a uma camada de mistura entre dois fluidos, um líquido e outro gasoso, de razão entre as densidades igual a 800, sendo o líquido com velocidade V_1 e o gás com velocidade zero como proposto por Hoyt e Sellin (1989). Esta associação pode ajudar os pesquisadores que visam trabalhar com o ressalto, a melhor compreender esse fenômeno.

11 Referências Bibliográficas

AITECH (1997), "*WaveWatcher TV-PCI User's Guide*".

BAKHMETEFF, B. A. e MATZKE, A. E. (1938), "*The hydraulic jump in sloping channels*", *Transactions, American Society of Mechanical Engineers*, V.60, no. 2, p.111-118 apud CHOW, V.T. (1959), "*Open Channel Hydraulics*", McGraw-Hill Book Co., Inc., p.393-438.

BAKHMETEFF, B. A., e MATZKE, A. E. (1946), "*The hydraulic jump in terms of dynamic similarity.*" *Trans. Am. Soc. Civil Engrs. 101*, p.630-680.

BRADLEY, J. N. e PETERKA, A. J. (1957), "*The hydraulic design of stilling basins: Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I)*". *J. Hydraulics Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs. 83*, HY5, p1-24.

BROWN, G. e ROSHKO, A. (1974), "*On density effects and large structures in turbulent mixing layer*", *J. Fluid Mech.*, V64, Parte 4, p.775-816.

CHOW, V.T. (1959), "*Open Channel Hydraulics*", McGraw-Hill Book Co., Inc., p.393-438.

ELEVATORSKI, E. A. (1959), "*Hydraulic Energy Dissipators*", McGraw-Hill, New York.

ENDRES, L.A.M. (1990), "*Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório. Instituto de Pesquisas Hidráulicas*", (IPH). Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Brasil.

ENZO, L., "*The Science of Water, The Foundation of Modern Hydraulics.*" ASCE Press, p.112-114, 182-187.

FRENCH, R.H. (1987), "*Open-Channel Hydraulics*", McGraw-Hill Co, p.75-111.

- GUNAL, M. e NARAYANAN, R. (1996), "*Hydraulic Jump in Sloping Channels*", *J. of Hydraulic Engineering*, V122, No. 8, p.436-442.
- HAGER, W. e BREMEN, R. (1989), "*Classical hydraulic jump: sequent depths*", *J. Hydraulic Research*, V27, No. 5, p.565-585.
- HAGER, W.H. (1992), "*Energy Dissipators and Hydraulic Jump*", *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, p.5-44.
- HICKOX, G. H. (1944), "*Discussion on The hydraulic jump in sloping channels by Carl E. Kindsvater*", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, V109, p.1125 – 1135 apud CHOW, V.T. (1959), "*Open Channel Hydraulics*", *McGraw-Hill Book Co., Inc.*, p.393-438.
- HORNUNG et al. (1995), "*The flow field downstream of a hydraulic jump*", *J. Fluid Mech.*, V287, p.299-316.
- HOYT, J.W. e SELLIN, R.H.J. (1989), "*Hydraulic Jump as "Mixing Layer"*", *J. Hydraulic Engineering*, V115, No. 12, p.1607-1614.
- HUSAIN et al. (1994), "*Length and depth of hydraulic jump in sloping channels*", *J. Hydraulic Research*, V32, No. 6, p.899-910.
- JIMENEZ, J. (1980), "*On visual growth of a turbulent mixing layer*", *J. Fluid Mech.*, V96, part. 3, p.447-460.
- KINDSVATER, C. E. (1944), "*The hydraulic jump in sloping channels*", *Transactions, American Society of Civil Engineers*, V109, p.1107 – 1120 apud CHOW, V.T. (1959), "*Open Channel Hydraulics*", *McGraw-Hill Book Co., Inc.*, p.393-438.
- LENCASTRE, A. (1991), *Hidráulica Geral*, Edição do autor.

- LEUTHEUSSER, H.J. e KARTHA, V.C. (1972), “*Effect of inflow condition on hydraulic jump*”, *Jour. of Hyd. Div., Proc. ASCE*.
- LONG, D., RAJARATNAM, N. STEFFER, P. e SMY, P. (1991), “*Structure of flow in hydraulic jumps*”, *Jour. of Hyd. Research*, V29, No. 2, p.207-218.
- MARQUES, M., DRAPEAU, J. e VERRETTE, J.L. (1997), “*Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico*”, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH)*, V.2, p.45 – 52.
- MARQUES, M. G., OLLERMANN G., WEILLER C. e ENDRES L. A. M. (1998) Perda de Carga No Interior de um Ressonho Hidráulico a Jusante de Vertedouro. XVIII Congresso Latino Americano De Hidráulica Oaxaca, México, Outubro, 1998.
- MCCORQUODALE, J. A. e KHALIFA, A. (1983), “*Internal Flow in Hydraulic Jumps*”, *J. Hydraulic Engineering*, V109, No. 5, p.684-701.
- MOSSA, M. e TOLVE, U. (1998), “*Flow visualization in Bubbly Two-Phase Hydraulic Jump*”, *Transactions of the ASME*, V120, p.160-165.
- OHTSU, I. e YASUDA, Y. (1994), “*Characteristics of supercritical flow below sluice gate*”, *J. Hydraulic Engineering*, V120, No. 3, p.332-346.
- PANASONIC, *Operating Instructions – OmniMovie VHS PV-610D*.
- PETERKA, A. J. (1958), “*Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*”, *United States Department of the Interior Bureau of Reclamation*. Em (1974) é editado a sexta versão.
- PINHEIRO, A.A.N. (1995), “*Acções Hidrodinâmicas em solerias de bacias de dissipação de energia por ressalto*”, *Tese submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa*.

- RAJARATNAM, N. (1962), "*Profile Equation for Hydraulic Jump*", *Water Power*, V.14, p.324-327 apud HAGER, W.H. (1992), "*Energy Dissipators and Hydraulic Jump*", *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, p.5-44.
- RAJARATNAM, N. (1965.a), "*Submerged hydraulic jump*", *Proc. ASCE, J. Hydraulics Division*, V.91 (HY4), p.71-96; Discussão 1966, V.92 (HY1), p.146-155; V.92 (HY2), p.420-421; V.92 (HY4), p.154-156; V.92 (HY6), p.207; 1967 V.93 (HY3), p.179 apud VISCHER, D.L. e HAGER, W.H. (1995), "*Energy Dissipators*", *IAHR, Hydraulic Structures Design Manual*, p.43-61.
- RAJARATNAM, N. (1965.b), "*The hydraulic jump as a wall jet*", *Jour. of Hyd. Div., Proc. ASCE*.
- RAJARATNAM, N. (1966), "*The hydraulic jump in sloping channels*", *J. Irrigation and Power (India)* 23 (abril), p.137-149. Discussão 1967, 24 (julho), p.285-293 apud HAGER, W.H. (1992), "*Energy Dissipators and Hydraulic Jump*", *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, p.5-44.
- RAJARATNAM, N. (1967), "*Hydraulic Jumps, Chap. In Advances in Hydrosience*", V4, por Chow V.T., (ED.), Academic Press, Nova Iorque e Londres, p. 218-219, 249.
- RAJARATNAM, N. e SUBRAMANYA, K. (1968), "*Profile of hydraulic jump*", *Jour. of Hyd. Div., Proc. ASCE*.
- RESH, F. J. e LEUTHEUSSER, H. (1972), "*Reynolds Stress Measurements in Hydraulic Jumps*", *J. of Hydraulic Research*, V.10, no. 4, p.409-430.
- RESCH, F.J. e LEUTHEUSSER, H. J. (1974), "*Bubbly Two-Phase Flow in Hydraulic Jump*", *J. Hydraulics Division*, V100, No. HY1, p.137-149.
- ROUSE, H., SIAO, T.T. e NAGARATNAM, S. (1959), "*Turbulence characteristics of the hydraulic jump*", *Trans. ASCE*, V124.

- SAFRANEZ, K. (1929) "*Untersuchungen über den Wechselsprung (Researches relating to the hydraulic jump)*", *Der Bauingenieur, Berlin*, V.10, no. 37, p.649-651 apud CHOW, V.T. (1959), "*Open Channel Hydraulics*", *McGraw-Hill Book Co., Inc.*, p.393-438.
- SCHLICHTING, H. (1979), "*Boundary-layer Theory*", *Mc.Graw-Hill, New York, N.Y.*.
- SCHRÖDER, R. (1963), "*Die turbulente Strömung im freien Wechselsprung*", *Habilitationsschrift, Mitteilung*, V.59, *Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, TU Berlin* apud HAGER, W.H. (1992), "*Energy Dissipators and Hydraulic Jump*", *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, p.5-44.
- SINNIGER, R. O. e HAGER, H. W. (1989), "*Constructions Hydrauliques – Ecoulements Stationnaires*", *Presses Polytechniques Romands*, p.321.
- U.S. BUREAU OF RECLAMATION (1955), "*Research studies on stilling basins, energy dissipators and associated appurtenances*", *Hydraulic Laboratory Report*, no. HYD 399 apud CHOW, V.T. (1959), "*Open Channel Hydraulics*", *McGraw-Hill Book Co., Inc.*, p.393-438.
- ULEAD SYSTEMS (1997), "*MediaStudio 2.5 Video Edition – User Manual*", Versão Conjunta.
- VISCHER,D.L. e HAGER, W.H. (1995), "*Energy Dissipators*", *IAHR, Hydraulic Structures Design Manual*, p.43-61.
- WINANT, C. D. e BROWAND, F. K. (1974), "*Vortex-pairing: the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds number*", *J. Fluid Mech*, V.63, Parte 2, p.237-255.
- YEH, H. H (1991), "*Vorticity generation mechanism in bores*", *Proc. R. Soc. London*, V.432, p.215-231 apud HORNUNG et al. (1995), "*The flow field downstream of a hydraulic jump*", *J. Fluid Mech.*, V287, p.299-316.

A. Anexo A: Métodos de Aferição dos Instrumentos de Medição

A.1.Introdução

A aferição dos instrumentos de medição é, sem dúvida, uma questão importante para a confiabilidade dos dados experimentais. Esta atividade demanda tempo e paciência do pesquisador, mas gratifica ao eliminar, ou inferir, fontes de erro importantes para validade do trabalho. Deve-se então identificá-los procurando soluções compatíveis com a realidade.

A seguir serão descritos métodos utilizados para validação das medidas obtidas da ponta linimétrica e do vertedor de entrada acoplados ao canal de ensaio.

A.2.Ponta Linimétrica

São construídas com escala graduada, com zero referenciado ao fundo do canal, e pela leitura em um atenuador de nível (copo) ligado à parede do canal, determina-se a posição média da superfície livre. Constam de uma ponta afilada que está ligada à escala graduada mencionada.

A leitura deve fazer-se descendo a escala até a ponta contatar o líquido. Esta determinação pode ser auxiliada pelo uso de uma lâmpada elétrica, cujo circuito se fecha através da água, no sentido descendente, quando toca a água. A operação ascendente da ponta pode ser influenciada pelo efeito de capilaridade junto à ponta.

Não há vantagem em que a ponta seja afilada, sendo preferível que seja arredondada com raio de cerca de 0,2mm e 0,3mm.

As pontas estão afixadas ao longo do canal espaçadas entre si de 2,5 m sendo em número de oito.

A.2.1.Metodologia

É aconselhável, para aferição, eliminarmos os efeitos de agitação da superfície livre. Para tal procedeu-se a aferição das pontas fixando vazões e velocidades do escoamento baixas. Isto foi possível devido a comporta de jusante, conforme Figura 5.1, capítulo 5 *“Instalações Experimentais”*.

Seguiu-se então o procedimento abaixo:

- Nivelou-se as pontas;
- Determinou-se o referencial zero da ponta em relação ao fundo do canal;
- Com vazões baixas, comporta a jusante ao máximo fechada e uma ponta móvel junto às fixa no canal, comparou-se os níveis encontrados;
- Repetiu-se o procedimento para outras vazões e níveis diferentes.

A.2.2. Resultados

Foram encontradas diferenças menores do que 1 mm ou 0,5% entre as pontas fixas e móvel.

A.3. Vazão

O sistema de alimentação do canal fornece uma vazão máxima de 70 l/s. O vertedor de entrada tem comprimento de 59,5 cm e paramento de 36 cm, além de possuir parede delgada sem contrações, com curva de cota - descarga dada pela equação (A.1) (em unidades de l/s):

$$Q = [1,0692 + 0,410256 (h + 0,0011)] (h + 0,0011)^{\frac{3}{2}} \quad (\text{A.1})$$

onde h é a lâmina de água (centímetros) acima da crista do vertedor.

Foi adotado para sua aferição o método de integração de velocidades pontuais, como também, comparações com equações de vertedores, como as propostas por Bazin em 1898, Rehbock em 1912 e pela “*Société des Ingénieurs et Architects Suisses*” (S.I.A.S.) em 1947.

$$Q = 4,429 \mu l h^{\frac{3}{2}}$$

Bazin :

$$\mu = \frac{2}{3} \left(0,6075 + \frac{0,0045}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$$

Re hbock :

$$\mu = \frac{2}{3} \left(0,605 + \frac{1}{1050 h - 3} + 0,08 \frac{h}{p} \right) \quad (\text{B.2})$$

S.I.A.S.

$$\mu = \frac{2}{3} 0,615 \left(1 + \frac{1}{1000 h + 1,6} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$$

onde h é altura da lâmina de água (metros) acima da crista do vertedor;

p é a dimensão do paramento (metros) e

l é o comprimento do vertedor (metros).

Para confiabilidade das leituras do nível de água acima da crista do vertedor de entrada, utilizou-se uma ponta linimétrica devidamente aferida e nivelada, respeitando a distância mínima da soleira de $5h$ e outras recomendações conforme Lencastre (1957).

A.3.1. Medições de Velocidades

Para determinação da velocidade média na seção, utilizou-se um método empírico proposto pelo *S.I.A.S.*

O método consiste em sucessivas medidas de velocidade numa vertical, em diferentes seções conforme esquema abaixo (Figura A.1). As velocidades pontuais foram medidas com auxílio de um tubo de Pitot, com diâmetro de 0,5 cm, e líquido manométrico com densidade 1,585.

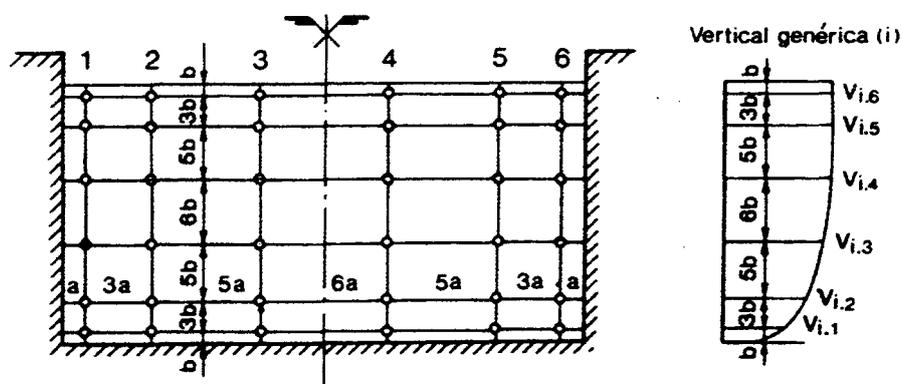


Figura A.1 – Esquema de determinação da velocidade média na seção.

Assim, para canais retangulares, a velocidade média, numa vertical genérica n , é dada por:

$$V_i = \frac{1}{12} (V_{i,1} + 2V_{i,2} + 3V_{i,3} + 3V_{i,4} + 2V_{i,5} + V_{i,6}) \quad (\text{A.3})$$

e a velocidade média na seção:

$$U = \frac{1}{12} (V_1 + 2V_2 + 3V_3 + 3V_4 + 2V_5 + V_6) \quad (\text{A.4})$$

A.3.2. Resultados

A Tabela A.1 mostra os resultados obtidos.

Tabela A.1 – Comparações entre as vazões medidas e calculadas para calibração do vertedor de entrada.

<i>Altura da lâmina (m)</i>	<i>Vazão em l/s</i>				
	<i>Bazin</i>	<i>Rehbock</i>	<i>S.I.A.S.</i>	<i>Vertedor</i>	<i>Medidas</i>
0,0570	16,58	15,19	15,09	15,31	14,41
0,0919	32,86	31,13	31,05	31,41	30,95
0,1425	63,07	60,81	60,88	61,39	61,33

A.4. Padronizações

Visando apresentação dos resultados adotar-se-á:

- As medidas feitas pelas pontas linimétricas serão em centímetros e terão precisão de duas casas decimais;
- As vazões utilizadas serão dadas em l/s pelo equacionamento proposto pelo *S.I.A.S.*, com precisão de uma casa decimal. Optou-se por essa escolha devido a que, para as maiores vazões, os valores medidos com o tubo de Pitot e os calculados por essa formulação, diferem de 0,3 %. Outro fator era as condições de nivelamento do vertedor de entrada que acarretou erros maiores de vazão entre a curva de descarga e os medidos.
- Respeitando as condições anteriores, os números de Froude, para fins de cálculo, serão calculados com uma casa decimal.

B. Anexo B - Análise Dimensional

B.1. Introdução

A análise dimensional é uma ferramenta muito utilizada pelos pesquisadores que trabalham com modelagem física. Permite auxiliar na determinação das variáveis intervenientes de um problema resultando parâmetros adimensionais que facilitam no trabalho laboratorial.

Neste item serão feitas uma análise genérica utilizando o Teorema de Buckingham, aplicada ao método de visualização e uma abordagem específica sobre o problema de redução de escala associado a este estudo.

B.2. Análise Dimensional Genérica sobre as Características do Ressalto Hidráulico

B.2.1. Características e dimensões básicas

Serão descritas abaixo as características físicas do ressalto e as propriedades do fluido inerentes a análise do fenômeno, importantes no processo de dissipação de energia, visando atender os objetivos do método de visualização aqui apresentado.

As dimensões básicas são massa [M], comprimento [L] e tempo [T].

B.2.1.1. Escoamento

Tabela B.1 – Variáveis do problema referentes ao escoamento.

<i>Símbolo</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Grandeza</i>
t	[T]	tempo
h_1	[L]	altura conjugada rápida
h_2	[L]	altura conjugada lenta
V_1	[LT ⁻¹]	velocidade média do escoamento em h_1
V_2	[LT ⁻¹]	velocidade média do escoamento em h_2
L	[L]	comprimento característico do ressalto hidráulico (ex.: L_j)

		comprimento do ressalto hidráulico, L_r comprimento do rolo)
ΔL	[L]	variação do comprimento característico
g	[LT ⁻²]	aceleração da gravidade
h_p	[L]	altura do perfil longitudinal do ressalto hidráulico no ponto $x = X$
h_r	[L]	altura do perfil longitudinal do rolo do ressalto hidráulico no ponto $x = X$
Δh_p	[L]	variação da altura do perfil longitudinal do ressalto hidráulico
Δh_r	[L]	variação da altura do perfil longitudinal do rolo
ΔH	[L]	dissipação de energia ao longo do ressalto hidráulico
$\delta_{(x=0)}$	[L]	espessura da camada limite para x (início do ressalto) igual a zero

B.2.1.2. Geométrica

Tabela B.2 – Variáveis referentes a geometria do escoamento.

<i>Símbolo</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Grandeza</i>
x, y, z	[L]	coordenada longitudinal, altura e profundidade do escoamento a partir do início do ressalto
b	[L]	largura do canal
I	-	declividade do canal

B.2.1.3. Fluido

Tabela B.3 – Variáveis referentes ao fluido.

<i>Símbolo</i>	<i>Dimensão</i>	<i>Grandeza</i>
ρ	$[ML^{-3}]$	massa específica da água
σ	$[MT^{-2}]$	tensão superficial do água
ν	$[L^2T^{-1}]$	viscosidade cinemática da água
ξ	$[ML^{-1}T^{-2}]$	coeficiente de elasticidade da água

B.3. Teorema de Buckingham

Para selecionar as variáveis pertinentes ao problema serão considerados:

- Fluido incompressível;
- Temperatura constante durante o ensaio;
- Massa específica constante;
- Regime permanente ;

Tendo em vista os pontos apresentados acima, as variáveis V_2 , I (declividade do canal não é um parâmetro variável), y (substituído por h_p e h_r), z (análise bidimensional do problema), ρ (constante), σ (constante) e ξ (constante) podem ser desprezadas nesta análise. Pelo equacionamento de alturas conjugadas de Bélanger h_2 pode ser determinado a partir de h_1 .

Selecionadas as variáveis do problema, definir-se-á o número de grupos adimensionais.

$$\Delta H = \mathfrak{F} (h_1, V_1, L, \Delta L, g, h_p, h_r, \Delta h_p, \Delta h_r, \delta_{(x=0)}, x, b, \nu) \quad (B.1)$$

B.3.1. Matriz dimensional

	ΔH	h_1	V_1	L	ΔL	g	h_p	h_r	Δh_p	Δh_r	$\delta_{(x=0)}$	x	b	v
M	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
T	0	0	-1	0	0	-2	0	0	0	0	0	0	0	-1

Para as matrizes adimensionais escolhidas somente foi possível encontrar determinantes diferentes de zero para matrizes quadráticas de ordem 2. O cálculo do determinante demonstra a existência ou não de relação linear das variáveis agrupadas, permitindo assim, se diferente de zero, a formação de uma base dimensional. Então, é possível estabelecer 12 números adimensionais listados no próximo item.

B.3.2. Grupos Adimensionais

Os grupos adimensionais vêm auxiliar o pesquisador a reduzir significativamente o número de ensaios, sem perda de informação essencial a análise do fenômeno. Fixando duas variáveis (h_1 e V_1) e associando-as a uma terceira, tem-se:

$$\Pi_1 : (h_1)^a (V_1)^b (g) \Rightarrow \frac{h_1 g}{V_1^2}$$

$$\Pi_2 : (h_1)^a (V_1)^b (v) \Rightarrow \frac{v}{V_1 h_1}$$

$$\Pi_3 : (h_1)^a (V_1)^b (\Delta H) \Rightarrow \frac{\Delta H}{h_1}$$

$$\Pi_4 : (h_1)^a (V_1)^b (L) \Rightarrow \frac{L}{h_1}$$

$$\Pi_5 : (h_1)^a (V_1)^b (\Delta L) \Rightarrow \frac{\Delta L}{h_1}$$

$$\Pi_6 : (h_1)^a (V_1)^b (x) \Rightarrow \frac{x}{h_1}$$

$$\Pi_7 : (h_1)^a (V_1)^b (b) \Rightarrow \frac{b}{h_1}$$

$$\Pi_8 : (h_1)^a (V_1)^b (\delta) \Rightarrow \frac{\delta_{(x=0)}}{h_1}$$

$$\Pi_9 : \frac{h_p}{h_1}$$

$$\Pi_{10} : \frac{\Delta h_p}{h_1}$$

$$\Pi_{11} : \frac{h_r}{h_1}$$

$$\Pi_{12} : \frac{\Delta h_r}{h_1}$$

Sugerindo uma remodelação de alguns grupos adimensionais, conforme Marques et al. (1997), adotar-se-á a substituição da altura conjugada rápida (h_1) no denominador pela altura do ressalto (h_2-h_1), exceto para os grupos π_7 e π_8 .

$$\Pi_3 : \frac{\Delta H}{(h_2 - h_1)}$$

$$\Pi_4 : \frac{L}{(h_2 - h_1)}$$

$$\Pi_5 : \frac{\Delta L}{(h_2 - h_1)}$$

$$\Pi_6 : \frac{x}{(h_2 - h_1)}$$

Complementando a remodelação dos grupos faz-se, também, as seguintes substituições:

$$\Pi_9 : \frac{(h_p - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

$$\Pi_{10} : \frac{(\Delta h_p - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

$$\Pi_{11} : \frac{(h_r - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

$$\Pi_{12} : \frac{(\Delta h_r - h_1)}{(h_2 - h_1)}$$

Visando ainda simplificar a análise dos resultados considerar-se-á:

$$\frac{L}{(h_2 - h_1)} \Rightarrow \frac{x}{(h_2 - h_1)}$$

$$\frac{\Delta L}{(h_2 - h_1)} \Rightarrow \frac{\Delta x}{(h_2 - h_1)}$$

Substituindo π_5 pela razão entre π_5 e π_4 , tem-se:

$$\Pi_5 = \frac{\Delta L}{L}$$

Pode-se, analisando o problema de dissipação de energia do ressalto, associá-lo aos seguintes grupos dimensionais:

$$\frac{\Delta H}{(h_2 - h_1)} = \mathfrak{F} \left(Fr_1, Re_1, \frac{x}{(h_2 - h_1)}, \frac{L}{(h_2 - h_1)}, \frac{\Delta L}{L}, \frac{b}{h_1}, \frac{\delta_{(x=0)}}{h_1}, \frac{(h_p - h_1)}{(h_2 - h_1)}, \frac{(h_r - h_1)}{(h_2 - h_1)}, \frac{(\Delta h_p - h_1)}{(h_2 - h_1)}, \frac{(\Delta h_r - h_1)}{(h_2 - h_1)} \right) \quad (B.2)$$

B.4. Efeito de redução de escala aplicada à modelação do ressalto no experimento.

A redução das dimensões onde ocorre o fenômeno pode influenciar nos resultados e análise das características do ressalto. Uma ênfase deve ser dada ao problema, podendo citar o trabalho de Hager e Bremen (1989) que apresentaram limites práticos dessa influência.

Hager e Bremen (1989) determinam que, para evitar o efeito de escala em modelação de ressalto hidráulico deve-se, para $Fr_1 < 10$, $w = h_1/b < 0,1$ e $Re_1 > 10^5$, respeitar uma vazão específica de $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ ($v = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Pinheiro (1995) também apresentou uma regra prática visando a análise de flutuações de pressões no eixo central do canal. Este só seria afetado para larguras de canais inferiores a $3 h_2$ observado.

Na tabela abaixo apresenta-se a análise do trabalho experimental.

Tabela B.4 – Efeito de escala aplicado ao experimento – análise teórica.

h_1 (cm)	Velocidade (m/s)	Fr_1	Re	$w = h_1/b$	Hager e Bremen (1989)	Pinheiro (1995)	Conclusões	
					w_L	$b > 3h_{2obs}$	w_L	$3h_{2obs}$
6,46	2,31	2,9	1,49E+05	0,162	0,959	0,744	s.e.	c.e.
3,36	2,19	3,8	7,36E+04	0,084	0,599	0,549	s.e.	c.e.
1,37	2,55	7,0	3,49E+04	0,034	0,131	0,430	c.e.	c.e.

b é a largura do canal igual 40cm.

s.e. é sem efeito de escala

c.e. é com efeito de escala

viscosidade cinemática igual a 1×10^{-6}

Estas regras práticas são limites, não deixando evidente a que tipo de efeitos pode acarretar caso não respeitados. Na discussão dos resultados este item será novamente abordado.

B.5. Conclusões

Os limites apresentados por Pinheiro (1995) objetivam a análise das flutuações de pressões em soleiras de bacias de dissipação. É, portanto, difícil analisar sua verdadeira influência na determinação das características do ressalto.

A análise abordada por Hager e Bremen (1989) enfatiza os objetivos deste estudo dando maior confiabilidade para as conclusões dos resultados aqui apresentados.