

Análise de Macroturbulência em Estruturas de Dissipação de Energia por Meio do Estudo de Variação de Pressões e Níveis

Eder Daniel Teixeira, Marcelo Giulian Marques, Carlos Barreira Martinez

Jaime Federici Gomes, Luiz Augusto Magalhães Endres

IPH-UFRGS – Av. Bento Gonçalves, 9500

91.501-970 – Agronomia – Porto Alegre – RS

Recebido: 19/11/02 - revisado: 19/09/03 - aceito: 30/03/04

RESUMO

O conhecimento do processo de dissipação de energia em canal com emprego do ressalto hidráulico passa, obrigatoriamente, pela determinação das características da distribuição longitudinal de pressão junto ao fundo do escoamento e variação de sua amplitude, assim como pela análise de oscilações de níveis de água em escoamento. O presente trabalho relata os estudos desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na área de análise de macroturbulência em estruturas de dissipação de energia, através do estudo da variação instantânea de pressões e níveis. Mais especificamente, o trabalho sugere uma seleção de parâmetros para adimensionalização das pressões medidas, em função das características hidráulicas do escoamento, em busca de tendências de comportamento e compara os resultados obtidos com medições efetuadas em estruturas de dissipação montadas em laboratórios e executadas em protótipo. Os resultados mostram que esta adimensionalização pode ser adotada para previsões preliminares de grandezas em sistemas reais. Para avaliação e estudo da parcela flutuante da pressão foram efetuadas medições em um ressalto hidráulico a jusante de vertedor para uma faixa de números de Froude compreendida entre 4,5 e 10,0. Por fim, é apresentada uma descrição de um sistema de visualização das características do ressalto hidráulico a jusante de uma comporta, com enfoque para solução de baixo custo, que fornece resultados de boa qualidade.

Palavras-chave: ressalto hidráulico, flutuação de pressão, dissipação de energia.

INTRODUÇÃO

O controle da energia hidráulica a ser dissipada a jusante das estruturas de dissipação de energia tem como objetivo fazer com que os escoamentos se processem na forma mais tranquila possível e que as erosões regressivas, provenientes do aumento da vazão específica, não coloquem em risco a segurança das mesmas.

Pode ser investigado o emprego de diversos tipos de estruturas devendo-se escolher a mais adequada sob o ponto de vista da eficiência hidráulica e da economia, sem negligenciar os aspectos de segurança da obra.

Com a facilidade de acesso a equipamentos de computação e instrumentos de reprodução de imagens, a pesquisa na área dos fenômenos hidráulicos teve impulso significativo. A observação puramente visual dos fenômenos envolvidos em escoamentos na natureza, como realizada nos primórdios da investigação científica, é a forma mais simples para seu estudo sem, no entanto, possibilidade de reprodução futura. Com este método, determinadas características do comportamento do fluido não podiam ser repetidos e analisados com a confiabilidade que hoje nos é permitida. O surgimento dos equipamentos fotográficos e, mais tarde, os equipamentos de vídeo, possibilita-

ram um grande avanço no campo de estudos básicos para a compreensão de fenômenos naturais associados a técnicas de medição de pressões, níveis e velocidades que empregam sensores de medição instantânea e média no tempo.

O ressalto hidráulico obtido em estruturas de dissipação de energia é, talvez, a maneira mais simples adotada para este fim. Essa dissipação é acompanhada por uma forte turbulência apresentando flutuações na superfície da água e, de modo geral, em todas as suas características, sejam estas de caráter interno ou externo. Quando um ressalto hidráulico é observado, pode-se notar, mesmo apenas visualmente, refluxos, surgimento de grandes turbilhões e intenso processo de aeração em sua estrutura. O ressalto hidráulico tem sido motivo de extensas pesquisas para engenheiros hidráulicos e outros profissionais da área, que procuram compreender a natureza de sua formação, desenvolvimento, dissipação de energia e macro características. Embora não exista um consenso sobre diversos desses aspectos, ao longo do tempo foram formuladas “teorias” e uma vasta análise experimental foi realizada. Neste campo, a visualização em foto e vídeo contribui como uma ferramenta poderosa gerando amplas possibilidades de análise do fenômeno.

O conhecimento de características do ressalto hidráulico tais como, superfície da linha de água, distribuição

de pressões médias, de flutuações de pressão e de valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência, junto ao fundo da estrutura de dissipação é importante para:

- o engenheiro de obras hidráulicas como subsídio na otimização das dimensões do dissipador (comprimento, cota de fundo, altura dos muros laterais);
- o engenheiro calculista no conhecimento da verdadeira grandeza dos esforços que agem sobre a estrutura e para permitir um dimensionamento estrutural econômico e seguro.

A descrição dos mecanismos básicos e dos efeitos globais da dissipação de energia para aplicação imediata em projetos de estruturas hidráulicas exige grande esforço analítico e experimental. O caráter não linear e bifásico da dissipação conduz a uma dinâmica do escoamento de alta complexidade, para a qual uma descrição analítica completa ainda não está disponível.

Sendo assim, neste trabalho é realizado um amplo estudo do ressalto hidráulico formado em canal. Duas diferentes abordagens são empregadas que, conforme é possível constatar, complementam-se nas informações que fornecem. Na primeira abordagem, um tratamento estatístico tradicional é aplicado sobre um conjunto de dados medidos por diferentes autores e instituições que empregaram sensores eletrônicos de pressão instalados no fundo de canais em laboratório e em estrutura de dissipação real. Na segunda abordagem, são estudadas as linhas da superfície da água de um canal em laboratório, através de visualização de imagens gravadas em vídeo resultantes de uma proposta que visa, não só a obtenção de imagens com a qualidade necessária ao fim proposto, mas também atender o objetivo com uma solução simples e de baixo custo.

METODOLOGIA EMPREGADA NA ANÁLISE ESTATÍSTICA DE PRESSÕES

A metodologia adotada nesta pesquisa consistiu em visualizar, analisar e associar a distribuição longitudinal de pressões a níveis de água da superfície do ressalto hidráulico. São feitas comparações entre resultados de diferentes pesquisadores e medições efetuadas exclusivamente para esta pesquisa.

A metodologia empregada na medição e análise aqui realizada consistiu na definição de tendências para parâmetros estatísticos da distribuição longitudinal de pressões “instantâneas” junto ao fundo do canal, na região do ressalto hidráulico, obtidos por diferentes pesquisadores em diferentes locais.

As amostras de dados de pressões analisadas foram adquiridas com frequências variando entre 50 e 100 Hz e com duração variando entre 5 minutos e 30 minutos.

Como o escoamento verificado no ressalto hidráulico é macroscopicamente turbulento e a pressão varia de forma aleatória em torno de um valor médio, o fenômeno deve ser analisado sobre uma base estocástica.

Muitos parâmetros que intervêm no fenômeno da dissipação de energia podem ser representados por equações reduzidas. A equação a seguir, por exemplo, representa um entre vários agrupamentos possíveis para a determinação da flutuação de pressão ao longo do ressalto. Podem ser montadas equações semelhantes para dados representativos de pressão média, assimetria e curtose dos dados (Marques et al 1995).

$$\frac{\sigma}{Y_2} = f\left(\frac{X}{L_n}; \frac{L_n}{\Delta H}; Fr; \frac{Y_2}{Y_1}\right) \quad (1)$$

onde

σ = flutuação de pressão, caracterizada pelo desvio padrão da amostra em análise;

Y_2 = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico;

X = posição da tomada de coleta da amostra em relação ao início do ressalto hidráulico;

L_n = comprimento do ressalto hidráulico;

ΔH = perda de carga total do ressalto hidráulico; e

Fr = número de Froude na entrada do ressalto hidráulico.

Para que sejam possíveis comparações entre as distribuições longitudinais das pressões, procurou-se uniformizar os resultados através do agrupamento de parâmetros adimensionais em função da posição relativa em que as medições foram realizadas no ressalto.

As etapas efetuadas para atingir os objetivos propostos foram as seguintes:

1. Coleta de dados através de revisão bibliográfica e junto a pesquisadores, obtidos em laboratórios e em protótipo; e
2. Verificação de tendências dos dados em função das características do escoamento (número de Froude, alturas conjugadas, perda de carga) e análise das distribuições longitudinais de:
 - a) Pressão média;
 - b) Flutuação de pressão:
 - b.1) Máximo coeficiente de flutuação de pressão;
 - b.2) Posição do coeficiente de máxima flutuação de pressão;
 - b.3) Posição do término da influência do ressalto hidráulico;

- c) Influência da submergência do ressalto hidráulico na distribuição longitudinal da flutuação de pressão;
- d) Coeficiente de assimetria das flutuações de pressão; e
- e) Coeficiente de curtose das flutuações de pressão.

Dados utilizados

Para o desenvolvimento do trabalho, foram analisados os seguintes dados brutos de amostras obtidas em laboratório e protótipo:

- a) Em laboratório:
 - Endres (1990): ressalto formado a jusante de vertedouro instalado em um canal com 0,72 m de largura por 15 m de comprimento, construído no Laboratório de Hidráulica do IPH/UFRGS. Foram coletadas amostras de pressão com uma frequência de 100 Hz durante 100 s, em 11 tomadas de pressão instaladas na parte plana central do fundo do canal, para cinco situações de escoamento, caracterizadas pelo número de Froude variando entre 4,3 e 8,6. Transdutores de pressão foram ligados às tomadas de pressão através de mangueiras plásticas com 2,00 m de comprimento;
 - Marques (1995): ressalto formado a jusante de vertedouro instalado em um canal com 0,60 m de largura por 12 m de comprimento, construído no Laboratoire d’Hydraulique du Departement de Génie Civil de l’Université Laval - Québec - Canadá, ensaiado em 1994, descrito com detalhes em Marques et al (1997). Foram coletadas amostras de pressão com uma frequência de 50 Hz durante 200 s em 22 tomadas, para seis situações de escoamentos com números de Froude variando entre 4,2 e 9,3. Os transdutores de pressão foram ligados às tomadas, por mangueiras com 0,55 m de comprimento;
 - Pinheiro (1995): ressalto formado a jusante de vertedouro instalado em um canal com 1,20 m de largura por 3,62 m de comprimento, construído no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – Lisboa. Uma placa foi utilizada na fixação dos transdutores junto ao fundo do canal, constando de cinco filas longitudinais de pontos de fixação separados por distâncias de 10 cm, iguais entre si, sendo que em cada fila longitudinal existem 11 pontos de fixação com mesmo espaçamento. A frequência de aquisição utilizada foi de 16 kHz, sendo ensaiados 5 diferentes números de Froude, cujo valor variou entre 6 e 10; e
 - UHE de Cana Brava (1999): medições efetuadas em modelo montado no Laboratório de Hidráulica pertencente a Furnas Centrais Elétricas, conforme relatório interno

de Furnas. Foram coletadas, somente, amostras de pressões médias.

b) Em protótipo:

- UHE de Porto Colômbia (1996): ressalto formado a jusante de vertedouro. Medições efetuadas na bacia de dissipação da Usina de Porto Colômbia pertencente a Furnas Centrais Elétricas. As medições em protótipo foram realizadas em 1996, em processo descrito pela Comissão de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da ABRH (1997). Foram coletadas amostras de pressão com uma frequência de 100 Hz durante um período variável entre 30 minutos e 45 minutos, em 7 tomadas de pressão, sendo 3 na concordância do perfil do vertedouro e 4 na parte plana do fundo da bacia. Os transdutores de pressão foram instalados faceados ao fundo da bacia. Para evitar diferenças no processo de estabilização do regime de escoamento, o presente trabalho selecionou 15 minutos das amostras totais, de onde foram desprezados os minutos iniciais (10 minutos ou mais) e os últimos 5 minutos.

Uniformização das condições hidráulicas

Para a apresentação das condições hidráulicas dos experimentos, foram feitas algumas considerações nos valores originalmente publicados visando padronizar o método de obtenção de determinadas grandezas:

- Endres (1990): foram reavaliadas as alturas conjugadas em função dos resultados encontrados por Marques et al (1997), uma vez que as duas estruturas eram idênticas e o primeiro adotou, para o cálculo da altura conjugada na entrada do ressalto, valores obtidos analiticamente, enquanto o segundo efetuou medições de velocidade e de altura da lâmina de água na entrada do ressalto;
- Pinheiro (1995): foram utilizados os valores de alturas conjugadas fornecidas em seu trabalho, uma vez que não havia como verificar as condições;
- UHE de Porto Colômbia (1996) – protótipo: foram utilizadas expressões analíticas nesta determinação, uma vez que era conhecido o nível do reservatório (N_r), abertura das comportas (a), vazão teórica vertida (Q) e nível a jusante (N_j) na casa de força próxima à bacia.
- UHE de Cana Brava (1999): foram utilizadas expressões teóricas para determinação da altura conjugada e grau de submergência, uma vez que estes valores não foram medidos no modelo. Es-

tas diferenças na determinação das características da altura conjugada podem provocar erros ou dispersões nos dados.

Pela análise das condições hidráulicas observou-se que o ressalto, para todas as condições ensaiadas por Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995), apresenta uma relação entre a altura de água e altura conjugada de saída no ressalto hidráulico (grau de submergência) muito próxima à unidade. Entretanto, para a UHE de Porto Colômbia (protótipo) e UHE de Cana Brava (modelo) a condição era de afogamento, ou seja, submergência maior do que 1. Este fato indicava que o ressalto hidráulico começava antes do ponto de tangência entre o raio de concordância e o fundo da bacia.

METODOLOGIA EMPREGADA NA VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

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

É importante salientar que os métodos normalmente utilizados para visualização do escoamento no ressalto têm por finalidade caracterizar o fenômeno por meios diferentes. Hoyt e Sellin (1989) utilizaram um mecanismo de visualização semelhante ao 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. Estes dois trabalhos serviram de base para a metodologia aqui adotada.

Nesta pesquisa o equipamento utilizado para captura das imagens do ressalto hidráulico foi uma câmera de vídeo marca Panasonic VHS modelo PV-610D (Panasonic, 1987). A câmera grava as imagens em forma de filme em 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.

A jusante da comporta empregada na formação do ressalto hidráulico foi montada uma janela de vidro com 2,10 m de comprimento e 50 cm de largura, na seção de trabalho para as visualizações. Uma escala foi montada junto ao fundo do canal possibilitando imagens referenciadas no comprimento, 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

ocasiona 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 nesta pesquisa 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.

Detalhes sobre os resultados das diversas alternativas de iluminação ensaiadas são apresentados em GOMES (2000).

Um exemplo da visualização obtida pode ser visto na figura 1.

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



Figura 1 - Esquema de iluminação acima do ressalto hidráulico com um nível de iluminação de 18250 LUX (escoamento da esquerda para a direita).

As imagens, após a “captura”, foram digitalizadas em um processo bastante comum entre os diferentes métodos existentes. É importante salientar que, como em qualquer conversão de sinais analógico – digital, ocorrem perdas de informações; no caso de imagens digitalizadas as perdas surgem, principalmente, no aspecto da nitidez.

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 aplicativos compressores de vídeo. 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 computador utilizado possui 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.

A placa de captura de vídeo deve ser suficientemente rápida para capturar vídeo com o nível de qualidade que o meio final requer. Para sistema de 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 (*dropping*) ou perda de quadros. Para os sistemas de vídeo “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 do que os citados.

O disco rígido armazena os quadros capturados, devendo ser suficientemente rápido para armazená-los assim que disponíveis 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 (velocidade com que um disco rígido pode atingir os dados específicos) de 10 ms ou menos, e uma taxa de transferência de dados (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. É recomendado um valor ao redor dos 6 MB por segundo.

Outros fatores que influenciam a qualidade de captura de imagens são a unidade central de processamento, compactadores disponíveis na placa e barramento de dados (conexão dos componentes do sistema).

Como mencionado anteriormente, 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 operações matemáticas, 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 e, 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 arquivo de saída que é gerada no processo. Dentre os existentes optou-se por arquivos do tipo “AVI” (Áudio Video Interleave) que podem ser utilizados pela maioria dos computadores e programas de edição de vídeo. A definição do tamanho por quadro é feita no momento da aquisição das imagens. Com as características do computador utilizado foi possível obter uma resolução de 320 x 240 “pixels” por quadro. Existem outras opções de resolução, mas esta foi a que possibilitou melhor qualidade e nitidez das imagens.

Nesta pesquisa 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, significando que 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 a perder 0,17 s a cada segundo de filme digitalizado.

Todos os arquivos AVI gerados são agrupados em meio magnético 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 em formato de arquivo “RGB” (*Red – Green – Blue*) são transferidas no formato

“TIFF” (*Tagged Image Format File*) e com 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 os resultados apresentados neste trabalho são baseados nas análises feitas na tela do monitor.

Em resumo, foi adotado para a análise do fenômeno, o tempo de imagens processadas de 2 s, equivalente a 50 imagens sucessivas para cada número de Froude ensaiado. Este valor foi selecionado 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 hidráulico, obtiveram resultados satisfatórios sobre características médias e instantâneas.

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. Um resultado surpreendente para os autores foi o de, ao transformar uma imagem RGB de 24 bits por pixel, onde temos 16.777.216 possibilidades de combinações de tons para cada cor (vermelho, verde e azul), foi possível eliminar efeitos prejudiciais na análise como, por exemplo, sombras e reflexos que no caso de ressalto hidráulico (fenômeno bifásico) são evidenciados.

As imagens depois de processadas são abertas em um aplicativo denominado “*Image Tool*”, de livre acesso pela Internet, desenvolvido pela *University of Texas Health Science Center* de San Antonio, Texas, Estados Unidos da América. Com o programa, é possível efetuar calibrações e medições 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, compatível com as planilhas eletrônicas mais comuns.

É importante salientar que foram respeitadas, em cada imagem, sua origem e resolução particular. 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 uma nova calibração de posicionamento era feita e considerada como padrão.

Na visualização do conjunto do 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; e
- as dimensões, trajetórias, mecanismo de entrada de ar, acoplamento e crescimento dos turbilhões.

A maioria das informações existentes sobre o ressalto são provenientes do emprego de técnicas intrusivas que, de alguma forma, interferem no escoamento. A presente proposta busca eliminar este tipo de influência e incrementar, com o auxílio da digitalização de imagens, ferramentas que as antigas técnicas de visualização por fotografias não eram capazes de realizar. Atualmente é possível visualizar através de imagens em vídeo todo o escoamento sem perda de informações, auxiliando no entendimento de fenômenos físicos envolvidos e no dimensionamento de obras hidráulicas. O método aqui proposto pode ser caracterizado, comparativamente, como uma técnica de baixo custo de implementação e de resultados de qualidade.

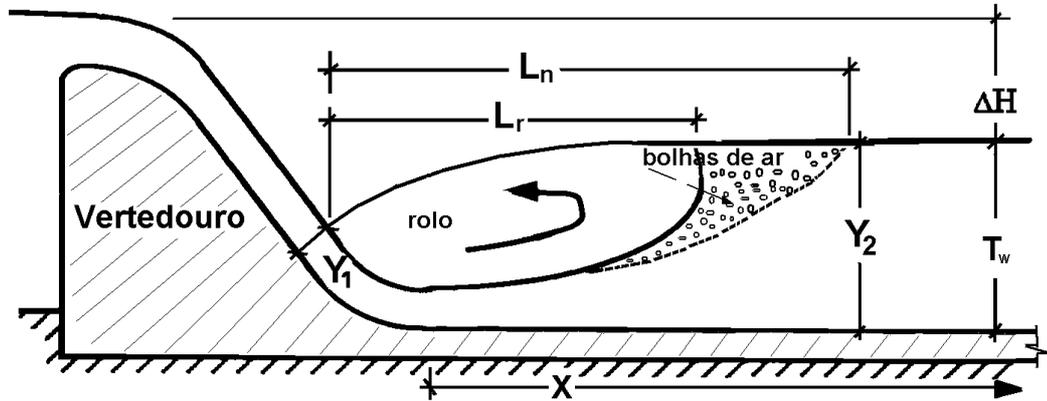
RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO COMPARATIVA SOBRE AS DISTRIBUIÇÕES DE PRESSÃO

O objetivo da análise aqui realizada sobre a distribuição longitudinal dos parâmetros estatísticos da pressão junto ao fundo do ressalto hidráulico (pressão média (P_x), desvio padrão da amostra (σ_x), coeficiente de assimetria (A_d), coeficiente de curtose (k)) é o de sugerir um formato desses valores que permita apresentações uniformizadas facilitando a visualização de possíveis tendências de comportamento.

A Figura 2, a seguir, caracteriza as grandezas envolvidas na análise dos parâmetros estatísticos da pressão, oriundas do escoamento no ressalto hidráulico, empregadas nesse trabalho.

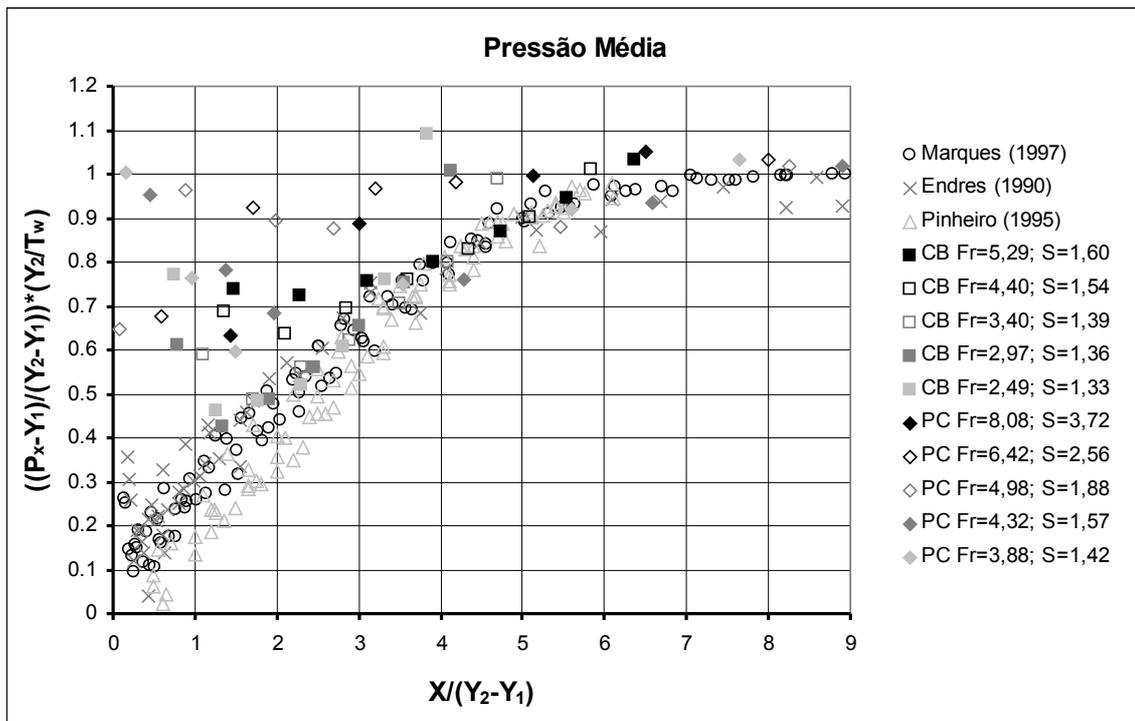
Pressão média (P_x)

A maior parte das análises de dados encontradas na literatura conhecida pelos autores diz respeito às características das flutuações de pressão isoladamente e, ainda, obtidas em instalações de laboratório. Apesar do grande interesse existente nestas determinações, para a previsão de esforços extremos, por exemplo, são necessárias informa-



X = distância em relação ao início do ressalto hidráulico; T_w = altura de água sobre o fundo da bacia a jusante do ressalto hidráulico; ΔH = perda de energia no ressalto hidráulico; Y_1 = altura conjugada na entrada do ressalto hidráulico; Y_2 = altura conjugada na saída do ressalto hidráulico; L_r = comprimento do rolo e L_n = ponto onde termina a influência do ressalto hidráulico.

Figura 2 - Parâmetros hidráulicos que envolvem a análise dos parâmetros estatísticos da pressão junto ao fundo do ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro.



PC = UHE Porto Colômbia (1996); CB = UHE Cana Brava (1999); S = submergência (T_w/Y_2) e Fr = número de Froude. (Obs: Para Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995), a submergência (S) do ressalto é igual a 1,0.)

Figura 3 - Pressões médias do ressalto hidráulico adimensionalizadas em relação às alturas conjugadas e à distância até o início do ressalto.

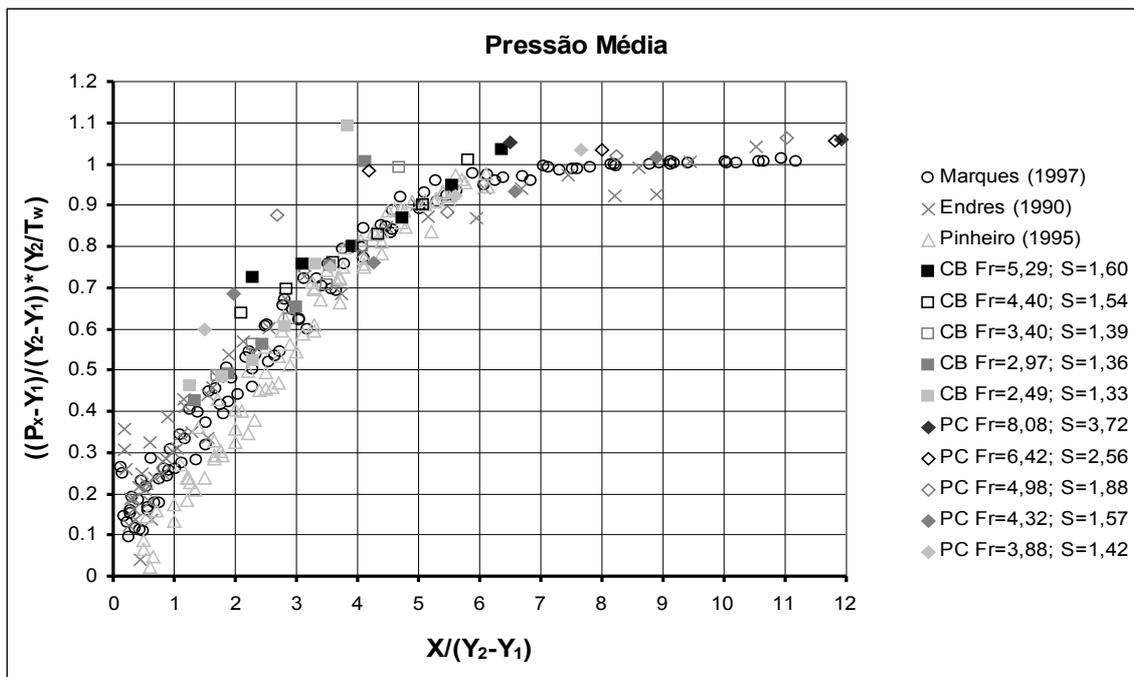
ções, também, sobre as pressões médias ocorridas, normalmente mais raras nas publicações, principalmente considerando determinações efetuadas em protótipos.

O conjunto de todos os dados de pressões médias adimensionalizadas obtidas nos modelos e no protótipo, utilizado neste trabalho, está apresentado na Figura 3, conforme proposto por Marques et al (1997).

Nessa figura, no eixo das abscissas tem-se a distância da medição em relação ao início do ressalto hidráulico (X) relacionada à diferença entre as profundidades conjugadas do ressalto ($Y_2 - Y_1$). Para o caso da submergência (T_w/Y_2) ser maior que 1 foi utilizado o método de Hager (1989) na determinação desta posição. No eixo das ordenadas aparecem os valores de pressão média (P_x), adimensionalizados com as alturas conjugadas (Y_1 e Y_2). Nessa figura, observa-se que os resultados do protótipo da UHE de Porto Colômbia (1996) e do modelo bidimensional da UHE Cana Brava (1999) estão significativamente afastados dos resultados das estruturas de laboratório que, praticamente, coincidem entre si. Este afastamento das curvas pode ser compreendido se considerarmos, neste caso, que a altura de água a jusante da bacia de dissipação (T_w) é superior à altura de água do escoamento em regime lento, ou seja, as estruturas funcionam afogadas. Apesar deste afastamento entre as curvas é possível identificar características comuns no que diz respeito ao padrão de crescimento, no início do ressalto, com a influência provável da curvatura do vertedouro nas primeiras tomadas de pressão, e a tendência da curva para uma linha horizontal, com o desenvolvimento do escoamento para jusante.

Visando maior uniformização na apresentação de resultados de pressões médias, no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, aqui está sendo proposta a inclusão de um fator adimensional de submergência do ressalto (T_w/Y_2), que torna os dados apresentados na Figura 3 visivelmente mais próximos, conforme pode ser visto na Figura 4.

As tomadas de pressão instaladas no trecho em curva na medição da UHE Porto Colômbia (1996) e UHE de Cana Brava (1999) foram excluídas por apresentarem influência do raio de concordância. Mesmo assim, observa-se que alguns pontos da UHE de Porto Colômbia (1996) e UHE de Cana Brava (1999) permanecem acima da nuvem de pontos. Analisando-se estes pontos constata-se que são valores referentes à primeira tomada de pressão situada logo ao término da curva de concordância, indicando que esses valores ainda devem estar sob influência do efeito da curva. Se observarmos os dados de Endres (1990) e Marques (1995), isoladamente, observa-se a mesma tendência, sendo esta influência maior para os menores valores do número de Froude.



PC = UHE Porto Colômbia (1996); CB = UHE Cana Brava (1999); S = submergência (T_w/Y_2) e Fr = número de Froude. (Obs: Para Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995), a submergência (S) igual a 1,0.)

Figura 4 - Pressões médias do ressalto hidráulico adimensionalizadas em relação às alturas conjugadas e à distância até o início do ressalto.

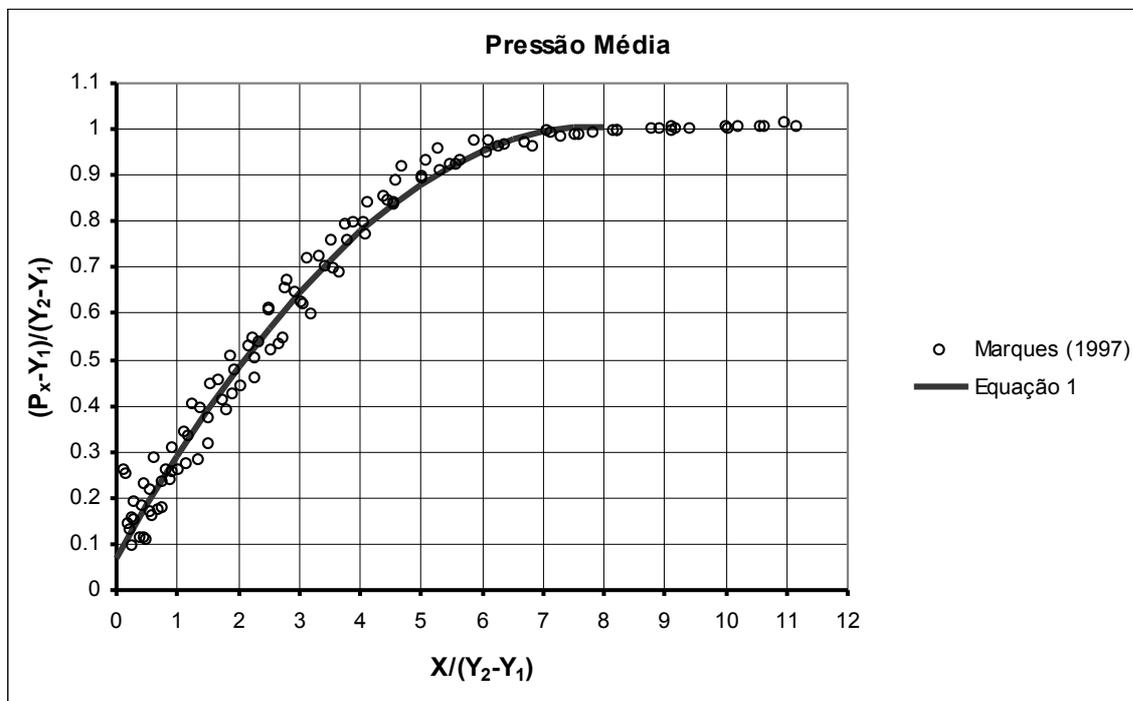


Figura 5 - Ajuste analítico aos dados de pressões médias de Marques et al (1997).

Excetuando as medições nas primeiras tomadas de pressão que estão próximas ao trecho em curva e, principalmente, para as situações com os menores números de Froude (maior vazão), os demais resultados apresentam uma mesma tendência o que leva à busca por uma curva de ajuste aos dados. Essa busca foi conduzida com tentativas de diferentes métodos, analíticos e visuais, aplicados aos dados das pressões adimensionalizadas medidas por Marques et al (1997). Este conjunto de dados foi selecionado pois é o que apresenta maior conhecimento sobre detalhes das condições de contorno (alturas conjugadas, etc.). O melhor resultado obtido nos ajustes é o visual (“a sentimento”), que alcança o valor máximo para a pressão adimensionalizada igual a 1,0 próximo à posição adimensionalizada igual a 8,0. Dentre as tentativas analíticas de ajuste, via método de mínimos quadrados, a melhor solução, que não conduziu a um elevado número de coeficientes, foi a de um polinômio do 2º grau (equação 1), cujo gráfico é, também, apresentado na Figura 5, em conjunto com os dados utilizados no ajuste.

$$\psi = -0,015\chi^2 + 0,237\chi + 0,07 \tag{2}$$

Onde:

$$\psi = \frac{(P_x - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)} / \left(\frac{T_w}{Y_2} \right) \tag{3}$$

$$\chi = \frac{X}{Y_2 - Y_1} \tag{4}$$

Obs.: A equação é válida para o intervalo $0 \leq \chi \leq 8$.

O ajuste desse polinômio considerou os valores de Marques et al (1997) excluindo os resultados das tomadas a jusante da posição adimensional 9, apresentando um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,98. A Figura 5 apresenta a equação ajustada e a dispersão dos pontos em relação à curva sugerida.

Pela equação sugerida considera-se que o efeito do ressalto hidráulico sobre a pressão média termina quando o valor de ψ atinge o seu valor máximo, próximo a 1, correspondendo à posição χ igual a 7,9, uma vez que a pressão média (P_x) é igual a profundidade de montante. Portanto, baseado na pressão média, pode-se adotar como comprimento do ressalto (L_n), nesse caso, $8 \cdot (Y_2 - Y_1)$.

Flutuação de pressão - coeficiente de flutuação de pressão

A previsão da distribuição longitudinal das flutuações de pressão que podem ocorrer junto ao fundo do canal no interior de um dissipador de energia por ressalto hidráulico é fator importante para a previsão das pressões

extremas. No entanto, a maior parte das análises realizadas diz respeito às características das flutuações de pressão obtidas em instalações de laboratório.

A maior parte dos autores representa a distribuição longitudinal (desvio padrão das amostras de flutuação de pressão) através dos coeficientes de flutuações de pressão (C_p) em função da posição relativa da distância da tomada ao início do ressalto (X) e da altura conjugada na entrada do ressalto (Y_1). O coeficiente (C_p) é definido como sendo a relação entre a raiz média quadrática da flutuação de pressão e a energia cinética (por unidade de volume) na seção, imediatamente a montante do ressalto hidráulico. O coeficiente de flutuação de pressão representa, fisicamente, a relação percentual entre as energias turbulenta e cinética em uma dada seção.

A utilização de $C_p=f(X/Y_1)$ apresenta uma distribuição diferente para cada número de Froude. Baseado nestas distribuições apresentadas pelos trabalhos dos diferentes autores consultados, procurou-se identificar tendências de comportamento para:

- Valor do máximo coeficiente de flutuação de pressão ($C_{p\text{máx.}}$).
- Posição de máximo coeficiente de flutuação de pressão ($X_{C_{p\text{máx.}}}/Y_1$).
- Posição do término da influência do ressalto (X_{fr}/Y_1).

Determinação dos máximos coeficientes de flutuação de pressão ($C_{p\text{máx.}}$)

Pela Figura 6 observa-se que os valores de $C_{p\text{máx.}}$, para o intervalo de número de Froude de 4 a 10, diminuem gradativamente desde o valor, em torno de 0,075 a 0,050 unidades de C_p , à medida que o número de Froude aumenta. Entretanto, os resultados apresentam uma dispersão de, aproximadamente, $\pm 0,01$ unidades de C_p . Para uma estimativa dos valores de $C_{p\text{máx.}}$ pode-se utilizar a equação (5) em um intervalo do número de Froude variando de 4 a 10.

$$C_{p\text{máx.}} \cong -0,05 Fr + 0,95 \quad (5)$$

Posição dos valores de máximo coeficiente de flutuação de pressão no ressalto ($X_{C_{p\text{máx.}}}/Y_1$)

Através da identificação dos coeficientes $C_{p\text{máx.}}$ procurou-se determinar a sua posição relativa no ressalto e associá-la com o número de Froude correspondente. A Figura 7 apresenta os resultados para ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro.

Analisando a Figura 7 observamos que os valores de $X_{C_{p\text{máx.}}}/Y_1$ crescem com o número de Froude, e pode-se observar que a dispersão dos resultados também aumenta com o número de Froude. Essa dispersão pode estar

associada à dificuldade na determinação de Y_1 que é menor à medida que aumenta o número de Froude, aumentando desta forma a possibilidade de erro na determinação do número de Froude e na posição $X_{C_{p\text{máx.}}}/Y_1$.

A equação 6 a seguir pode ser adotada como uma estimativa dos valores de $X_{C_{p\text{máx.}}}/Y_1$ em um intervalo do número de Froude variando de 3 a 10.

$$\frac{X_{C_{p\text{máx.}}}}{Y_1} \cong 2 (Fr - 1) \quad (6)$$

Determinação da posição do fim da influência do ressalto (X_{fr}/Y_1)

A posição X_{fr}/Y_1 é, neste trabalho, definida como sendo o local onde a perda de energia ocasionada pelas flutuações de pressão no ressalto hidráulico tende a zero, ou seja, iguala-se ao valor da energia residual do próprio canal.

Analisando a Figura 8, observa-se que os valores de X_{fr}/Y_1 crescem linearmente com o número de Froude. Para estimar os valores de X_{fr}/Y_1 , no intervalo do número de Froude de 4 a 11, podemos utilizar a equação 7.

$$\frac{X_{fr}}{Y_1} \cong 7 (Fr + 27) \quad (7)$$

Uniformização das flutuações de pressão – seleção de parâmetros para adimensionalização

O objetivo deste item é sugerir um método de apresentação dos valores da distribuição longitudinal do desvio padrão das flutuações de pressão, no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, visando possibilitar as estimativas dessa grandeza em sistemas reais.

A metodologia empregada para a uniformização da apresentação adimensional de dados representativos das flutuações de pressão partiu da reunião de medições de pressões no fundo de dissipadores de energia por ressalto, de diferentes fontes, de maneira a possibilitar uma análise conjunta destes dados em função das suas características geométricas e hidráulicas.

Quando da adimensionalização, foram utilizados os dados obtidos nas medições de três modelos em laboratório (Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995)) e de um protótipo (UHE de Porto Colômbia (1996)). As situações ensaiadas cobrem a faixa de valores do número de Froude do escoamento entre 4 e 10. A determinação de parâmetros para a representação das flutuações de pressão, em forma adimensional, foi feita empregando as posições de cada tomada de pressão, profundidades conjugadas do ressalto hidráulico, energia a jusante das comportas, posi-

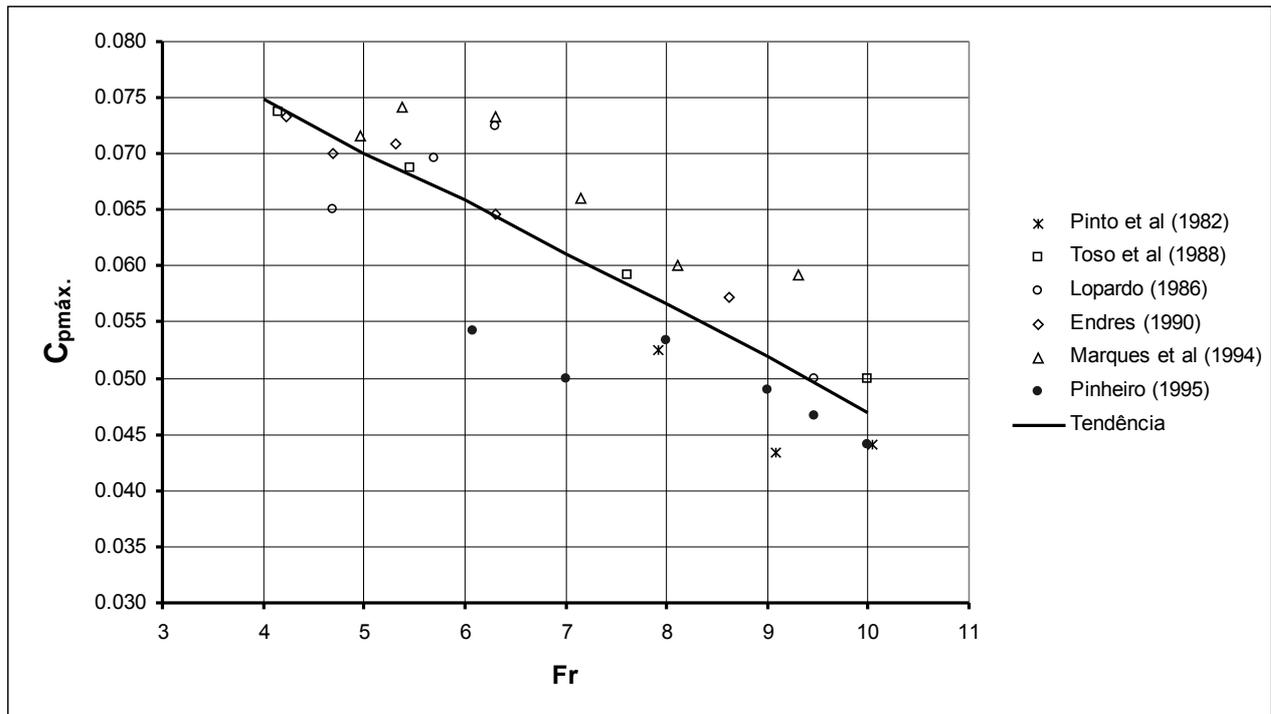


Figura 6 - Máximos coeficientes de flutuação ($C_{p\text{máx.}}$) em relação ao número de Froude do escoamento, para ensaios a jusante de vertedouro.

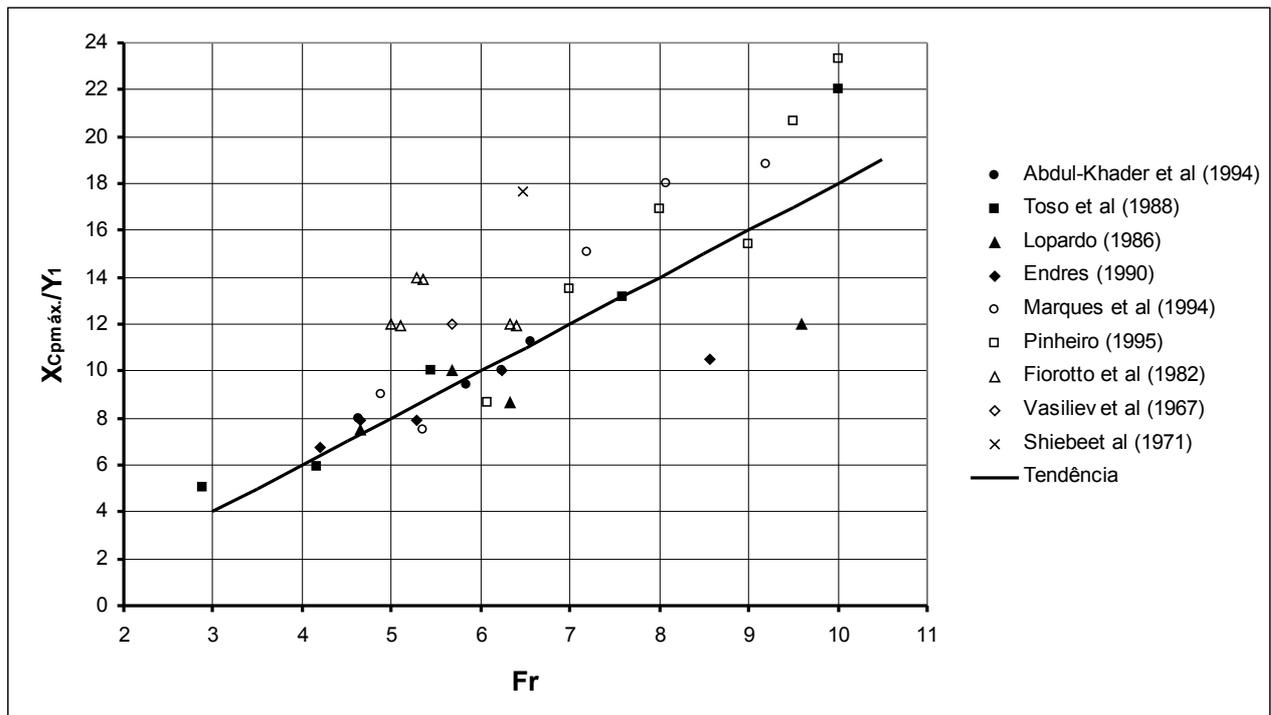


Figura 7 - Posição do máximo coeficiente de flutuação de pressão ($X_{C_{p\text{máx.}}}/Y_1$) em relação ao número de Froude do escoamento, para ensaios a jusante de vertedouro.

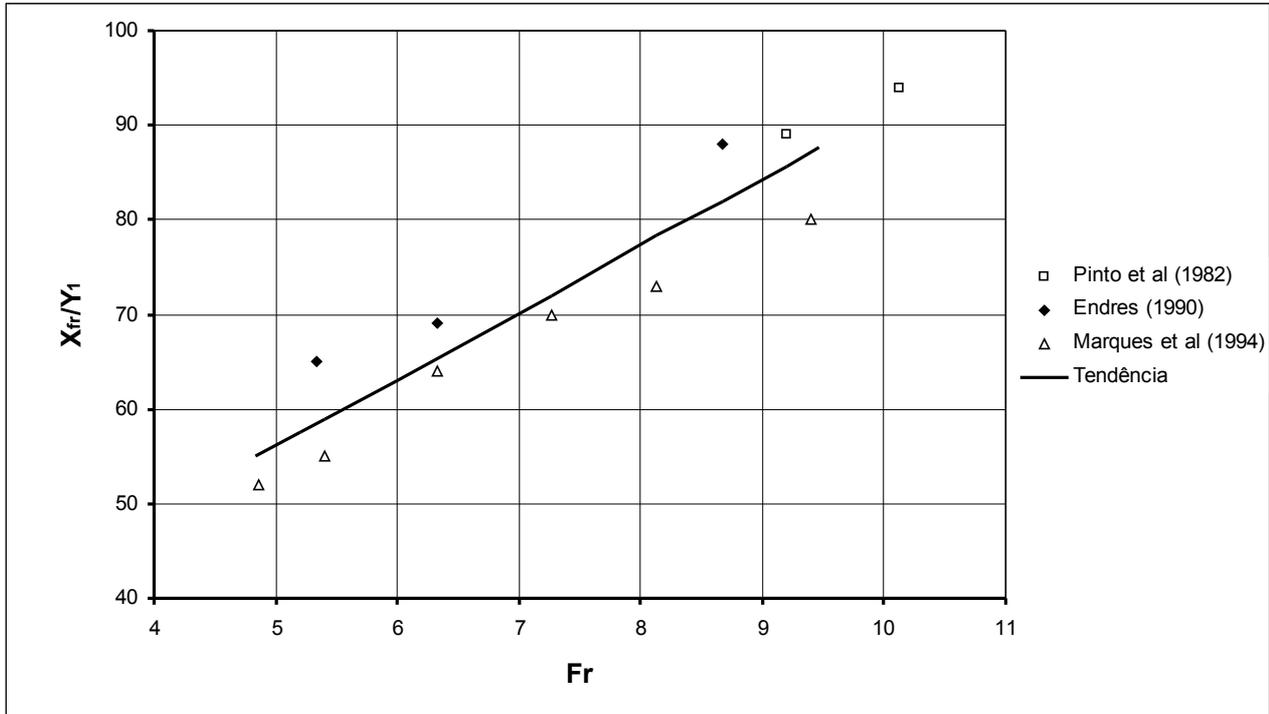
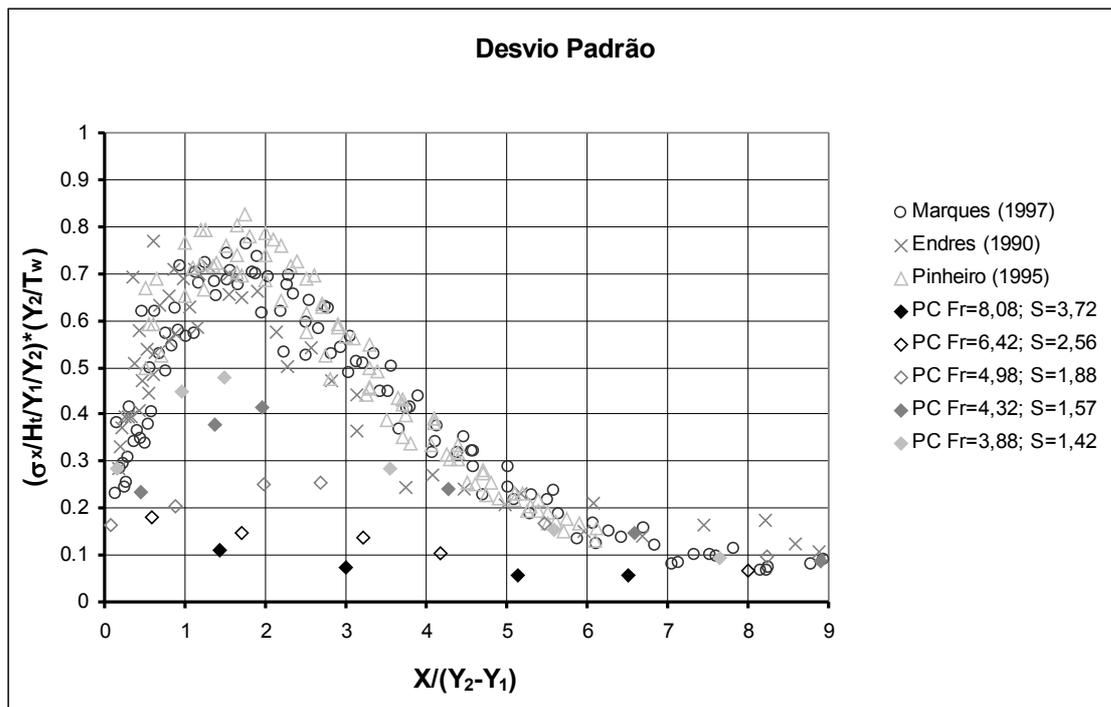


Figura 8 - Posição de X_{fr}/Y_1 em relação ao número de Froude do escoamento, para ensaios a jusante de vertedouro.



PC = UHE de Porto Colômbia (1996); S = submergência (T_w/Y_2) e Fr = número de Froude.

(Obs: Para Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995) submergência igual a 1,0.)

Figura 9 - Desvio padrão das flutuações de pressão (σ_x) adimensionalizado, uniformizado pelo fator de submergência $S = T_w/Y_2$

ção do início do ressalto, nível de água a jusante e submergência do ressalto.

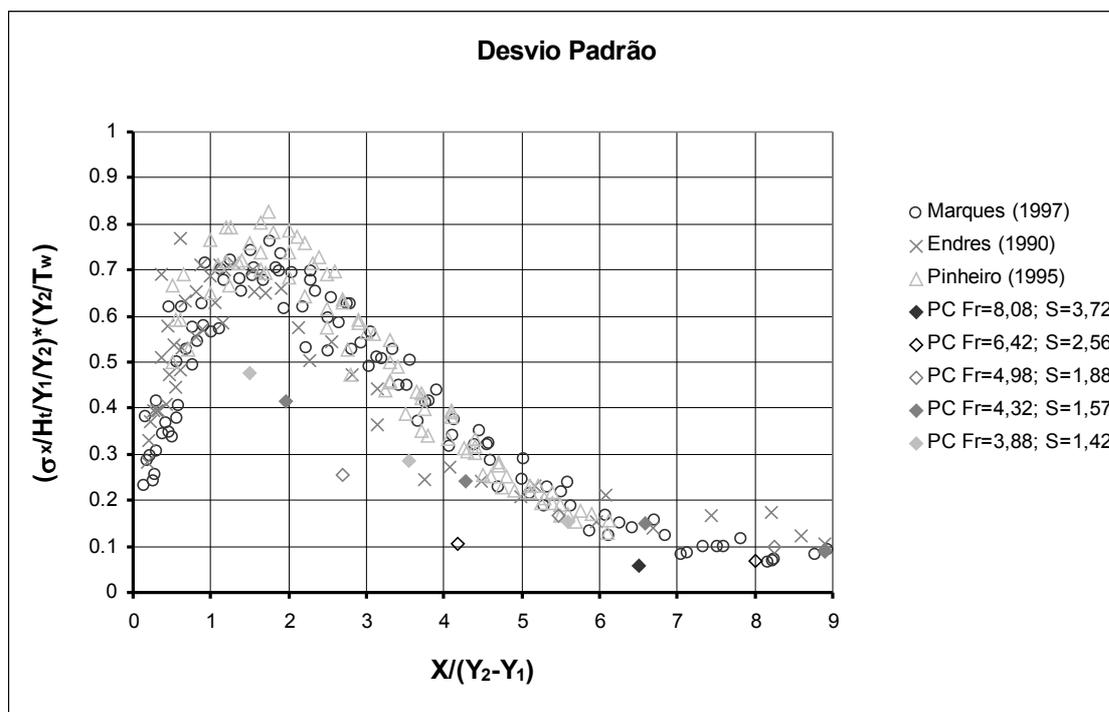
O conjunto de todos os dados de desvio padrão adimensionalizados obtidos nos modelos e no protótipo, utilizado neste trabalho, está apresentado na Figura 9, conforme proposto por Marques et al (1997).

Na Figura 9, os valores do desvio padrão das flutuações de pressão (σ_x) ao longo da distância em relação ao início do ressalto hidráulico (X), aparecem adimensionalizados pela perda de energia na estrutura ΔH e pelas alturas conjugadas na entrada (Y_1) e saída do ressalto hidráulico (Y_2), conforme foi sugerido por Marques et al (1997). As alturas conjugadas na entrada do ressalto para a UHE de Porto Colômbia (1996) e UHE de Cana Brava (1999) foram determinadas pelo método sugerido por Hager (1988). Nesta situação, observa-se que os resultados do protótipo UHE de Porto Colômbia, com número de Froude entre 8,08 e 3,88 estão significativamente afastados dos resultados das estruturas de laboratório que, praticamente, coincidem entre si, identificando comportamento semelhante ao apresentado na análise dos resultados de pressões médias. Esse afastamento das curvas do protótipo pode ser compreendido se considerarmos que, nesse caso, a altura de água sobre o fundo da bacia a jusante do ressalto hi-

dráulico (TW) é superior à altura conjugada lenta na saída do ressalto hidráulico, portanto funciona afogado. Apesar deste afastamento entre as curvas é possível identificar características comuns no que diz respeito ao padrão de crescimento e uma mesma tendência das curvas.

Visando agrupar a apresentação de resultados de flutuações de pressão no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, está sendo aqui proposta a utilização de um fator adimensional de submergência do ressalto (T_w/Y_2), o mesmo sugerido para a pressão média. Cabe salientar que as três primeiras tomadas medidas no protótipo da UHE Porto Colômbia estão situadas no trecho curvo do vertedouro, onde podem estar ocorrendo efeitos do raio de curvatura, o que impossibilita a análise por este método. Este agrupamento das curvas facilita a determinação de modelos para previsão de comportamentos de outras estruturas deste mesmo tipo.

Devido à grande diferença nos valores de flutuação de pressões adimensionais obtidas no protótipo da UHE de Porto Colômbia (1996), nas primeiras tomadas, instaladas ainda no trecho em curva do vertedouro, foram excluídos os resultados destas tomadas para a apresentação da Figura 10.



PC = UHE de Porto Colômbia (1996); S = submergência (T_w/Y_2) e Fr = número de Froude.

(Obs: Para Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995) submergência igual a 1,0.)

Figura 10 - Resultados do ajuste e comparação das medições para a região de validade das tomadas de pressão (excluindo as tomadas localizadas no trecho em curva).

Excetuando as medições nas primeiras tomadas de pressão que estão próximas ao trecho em curva e, principalmente, para as situações com os menores números de Froude (maior vazão), os demais resultados aparecem bem agrupados o que leva à busca por uma curva de ajuste aos dados. Essa busca foi conduzida com tentativas de diferentes ajustes, analíticos e “a sentimento”, aos dados das flutuações de pressões adimensionalizadas apresentadas por Marques (1995), na forma apresentada na Figura 11.

O melhor resultado, obviamente, obtido é o “a sentimento”, que alcança o valor máximo para a flutuação de pressão adimensionalizada Ω igual a 0,72 na posição adimensional χ igual a 1,75, e atinge um valor mínimo Ω no final do ressalto de 0,085, na posição χ igual a 8,5. Dentre as tentativas analíticas de ajuste, via método de mínimos quadrados, a melhor solução, que não conduziu a um elevado número de coeficientes, foi a utilização de dois polinômios do 2º grau (equações 8 e 9), cujo gráfico é, também, apresentado na Figura 11, em conjunto com os dados utilizados no ajuste.

$$\Omega = 0,19 - 0,537\chi - 0,159(\chi)^2 \quad 0 \leq \chi < 2,4 \quad (\text{eq. 8})$$

$$\Omega = 1,229 - 0,281(\chi) + 0,017(\chi)^2 \quad 2,4 \leq \chi \leq 8,25 \quad (\text{eq. 9})$$

Onde:

$$\Omega = \frac{\sigma}{\Delta H} \frac{Y_2}{Y_1} \left(\frac{Y_2}{T_w} \right)$$

$$\chi = \frac{X}{Y_2 - Y_1}$$

O ajuste destes polinômios considerou os valores de Marques (1995), excluindo os resultados das tomadas a jusante da posição adimensional 9. Os coeficientes de correlação (R^2) foram de 0,80 e 0,97, respectivamente.

Através das equações apresentadas, pode-se observar que a influência do ressalto sobre a flutuação de pressão termina quando o valor do parâmetro Ω tende a 0,08, correspondendo ao valor 8,25 do parâmetro χ . Portanto, baseado na flutuação de pressão, pode-se adotar como comprimento do ressalto:

$$L_n \cong 8,25(Y_2 - Y_1) \cong 8,0(Y_2 - Y_1) \quad (\text{eq. 10})$$

Face a isso, observamos que a equação apresentada é semelhante à equação proveniente dos dados da pressão média, resultado já esperado.

Com base nos resultados até aqui obtidos, é possível estimar a flutuação de pressão no fundo do canal no trecho reto, a jusante da formação do ressalto.

Além disso, os dados de protótipo concordam com as previsões dos ajustes matemáticos baseados em dados de modelo, embora as estruturas possuam diferenças expressivas em suas geometrias e, inclusive, no que diz respeito à existência de acessórios (comporta).

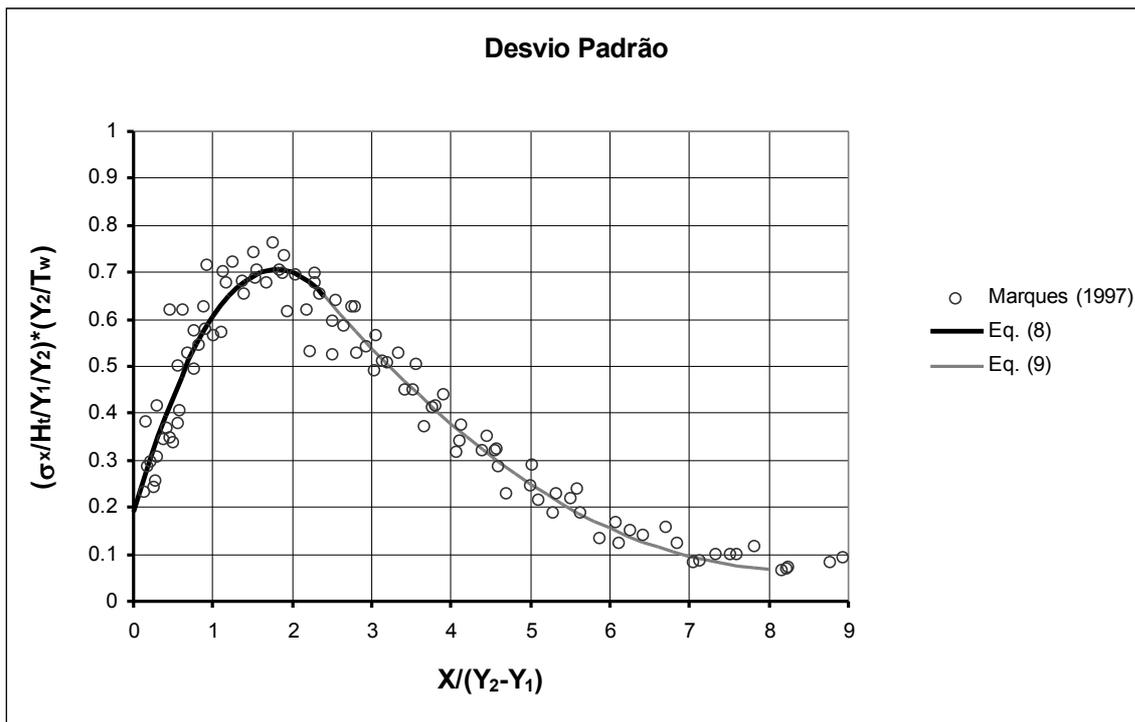
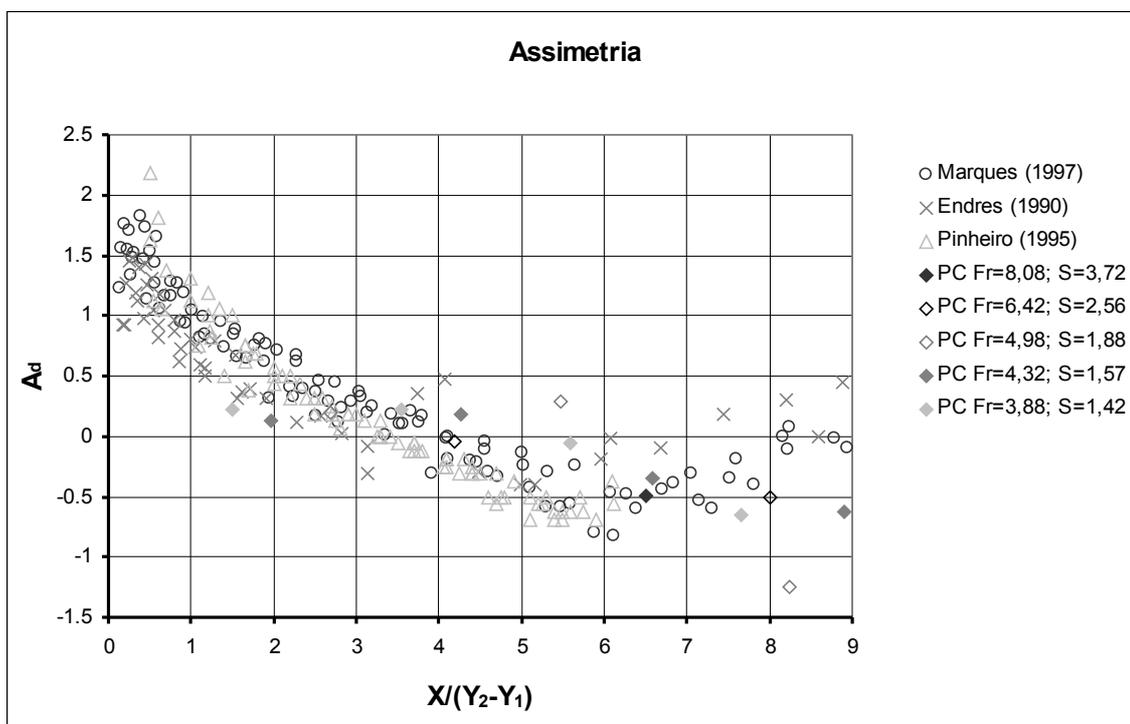


Figura 11 - Ajustes analítico e visual aos dados de Marques (1995).

Tabela 1 - Análise sintética dos dados dos coeficientes de assimetria (A_d)

Autor	Valores de A_d no início do ressalto	Posição $X/(Y_2-Y_1)$		
		Mudança de sinal de A_d	A_d mínimo	$A_d \cong 0$ (final do ressalto)
Lopardo (1986)	1,10	3	6	*
Marques (1995)	1,75	4	6	8,0
Endres (1990)	1,30	3,5	5,5	9
Pinheiro (1995)	1,90	3,5	6	*
Usina de Porto Colômbia(1996)	0,40	3,5	6,5	*

* Não foi possível determinar.



PC = UHE de Porto Colômbia (1996) e Fr = número de Froude.

Obs: Para Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995) submersão igual a 1,0.

Figura 12 - Coeficiente de assimetria (A_d) ao longo do ressalto hidráulico.

Análise da distribuição longitudinal do coeficiente de assimetria (A_d)

Segundo Lopardo (1987), a análise do coeficiente de assimetria (A_d) da função densidade de probabilidade das amostras de cada tomada de pressão pode informar sobre as zonas de separação do escoamento macro-turbulento. Para análise do coeficiente de assimetria (A_d) foram utilizados os dados medidos por Lopardo (1986), Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995) e UHE de Porto Colômbia (1996). Lopardo (1986) apresenta os da-

dos do coeficiente de assimetria através da utilização do parâmetro L_j (comprimento do ressalto hidráulico). Marques (1995) apresenta os dados de assimetria adimensionalizados em relação às profundidades conjugadas lenta e rápida. Para Endres (1990), foi feita uma análise estatística dos dados originais e para Pinheiro (1995) os valores foram extraídos dos gráficos apresentados em seu trabalho. A Figura 12 mostra os dados do coeficiente de assimetria (A_d) de Lopardo (1986), Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995) e UHE Porto Colômbia (1996).

A análise dos resultados do coeficiente de assimetria da Figura 12 permite afirmar sobre a existência de uma mesma tendência de distribuição ao longo do ressalto hidráulico. A Tabela 1 apresenta a posição onde ocorrem mudanças significativas no coeficiente de assimetria para os diversos autores.

Segundo Marques et al (1997), a justificativa para valores numéricos mais altos no início do ressalto é a existência do raio de concordância da entrada do canal com o fundo, somado à influência do rolo formado nesta região. Após a posição $X=1,0(Y_2-Y_1)$ ocorre a diminuição brusca dos valores de assimetria, pois segundo os autores, o escoamento não está mais sob a influência do raio de concordância.

O valor mínimo de A_d corresponde à condição onde o escoamento apresenta componentes verticais da velocidade mais importantes, considerada como a posição do final do rolo segundo Marques et al (1997). Face à isso e através da análise da Tabela 1 podemos estimar que o final do rolo situa-se em $L_r \cong 5,2$ a $6,5(Y_2-Y_1)$, podendo-se adotar o valor médio de $L_r \cong 6(Y_2-Y_1)$.

Para a posição relativa $X = 8$ a $9(Y_2-Y_1)$, observa-se que os valores da assimetria (A_d) são pouco superiores a zero (0), indicando que o fim da dissipação ocasionada pelo ressalto hidráulico situa-se em $L_n \cong 8,5(Y_2-Y_1)$.

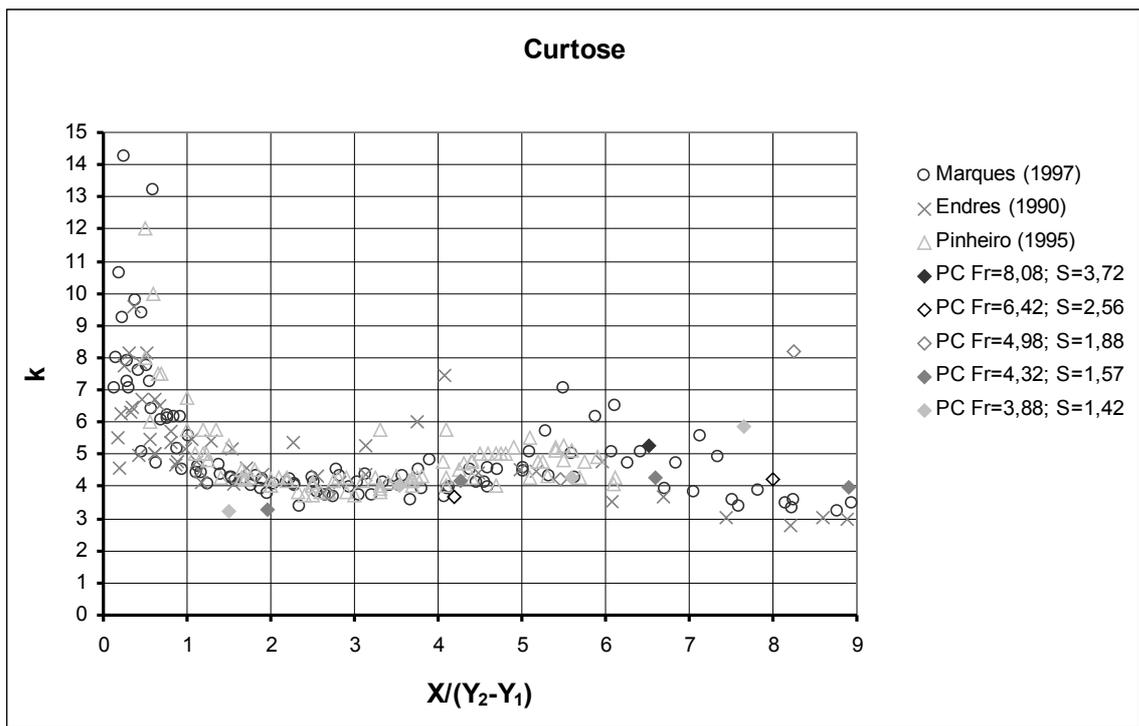
É conveniente ter-se em mente, quando da utilização destes resultados, que a oscilação média, segundo

Gomes (2000), é de $0,35(Y_2-Y_1)$ para o fim do ressalto e $0,50(Y_2-Y_1)$ para o fim do rolo.

Análise da distribuição longitudinal do coeficiente de curtose (k)

Para análise dos coeficientes de curtose (k) foram utilizados os dados medidos por Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995) e UHE de Porto Colômbia (1996). Os dados de curtose (k), proveniente do estudo desses autores, foram reunidos em um único gráfico a fim de analisar, compreender e verificar possíveis tendências do seu comportamento ao longo do ressalto hidráulico, conforme visto na Figura 13. Estes resultados devem conduzir a conclusões semelhantes às encontradas na análise do coeficiente de assimetria, apesar da maior dispersão dos dados.

A análise dos valores do coeficiente de curtose (k) na Figura 13 permite dizer que os resultados de Endres (1990), Marques (1995), Pinheiro (1995) e UHE de Porto Colômbia (1996) apresentam, praticamente, a mesma tendência de distribuição longitudinal. Verifica-se, no entanto, que existem pontos fora da tendência de distribuição, como é visto para os dados de Porto Colômbia (1996). Estes valores, sempre na mesma tomada de pressão, parecem indicar um provável problema na coleta.



PC = UHE de Porto Colômbia e Fr = número de Froude.

Figura 13 - Coeficiente de curtose (k) ao longo do ressalto hidráulico.

Como é visto na Figura 13, constatamos que os maiores valores do coeficiente de curtose (k), no início do ressalto hidráulico, foram obtidos por Marques (1995) e se aproximam de 14, seguidos por Pinheiro (1995) que atingem valores próximos a 12 e Endres (1990) 10,5. Os menores valores verificados são os de UHE de Porto Colômbia em torno de 4. À medida que avançamos na posição adimensional $X/(Y_2-Y_1)$, na região compreendida entre 1,5 e 4, observa-se que os valores do coeficiente de curtose (k) se aproximam de 4. Para a posição $X/(Y_2-Y_1)$ igual a 6, ocorre um aumento, situando-se em um valor médio de 5. No final do ressalto hidráulico, os valores encontrados por Marques (1995) e Endres (1990) têm um valor de aproximadamente 3.

RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO COMPARATIVA SOBRE A VISUALIZAÇÃO DE ESCOAMENTOS

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.

Descrição visual do fenômeno

Serão apresentadas nas figuras a seguir imagens obtidas nos ensaios para número de Froude igual a 2,9.

Na Figura 14 são apresentadas duas imagens sucessivas, com intervalo de tempo de 0,04 s, onde a região acinzentada 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 conforme descrito anteriormente. 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 14 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 o início da formação de ondas sobre a superfície, descrita com maior detalhe em GOMES (2000).

O crescimento dos turbilhões segue certas características 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 se moveu 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 elíptica como se fosse um “olho de gato”, como também descrito por Jimenez (1980).

Outro fator importante é que os turbilhões, após atingirem seu tamanho máximo, tendem a reduzir 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 auxilia em seu próprio crescimento e movimentação. É importante revisar que, segundo Hornung et al. (1995), em um ressalto que se movimenta longitudinalmente a vortacidade 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.

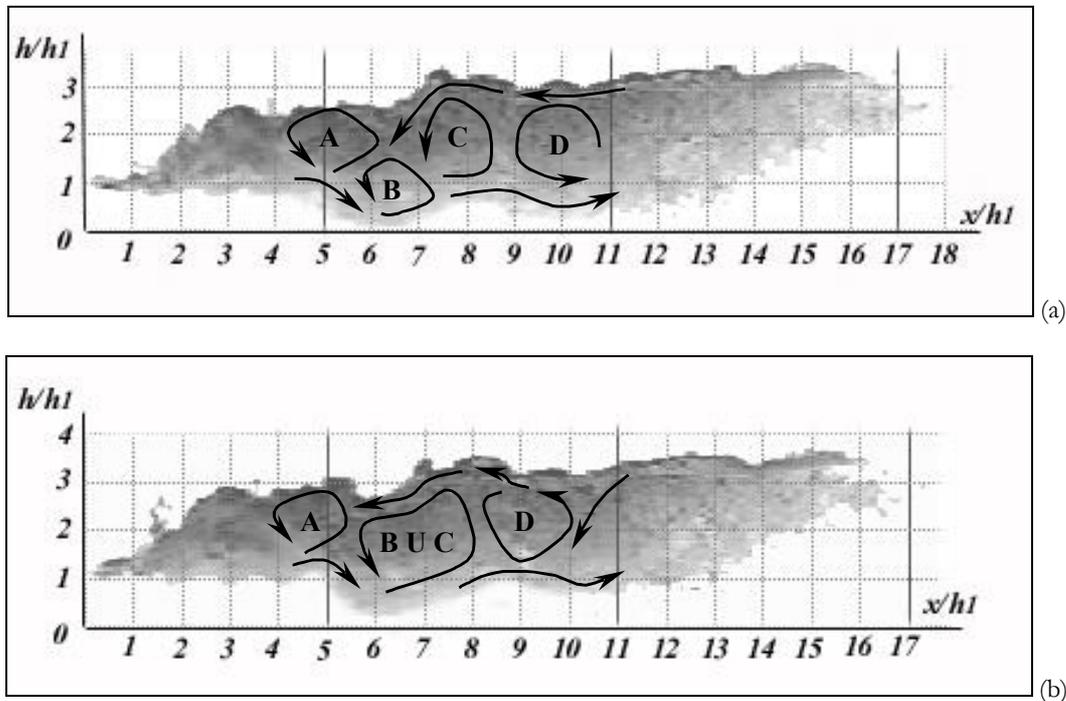


Figura 14 - Acoplamento entre turbilhões vizinhos entre 5 e 8 x/h_1 para Froude 2,9.

Uma questão essencial para descrever as características de crescimento de turbilhões e o processo de interação ondas – turbilhões, é entender como eles se movimentam. Novamente são apresentadas imagens sucessivas espaçadas de 0,04 s. 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/consequência 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 comportamento 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. Estas considerações podem ser vistas na figura 15.

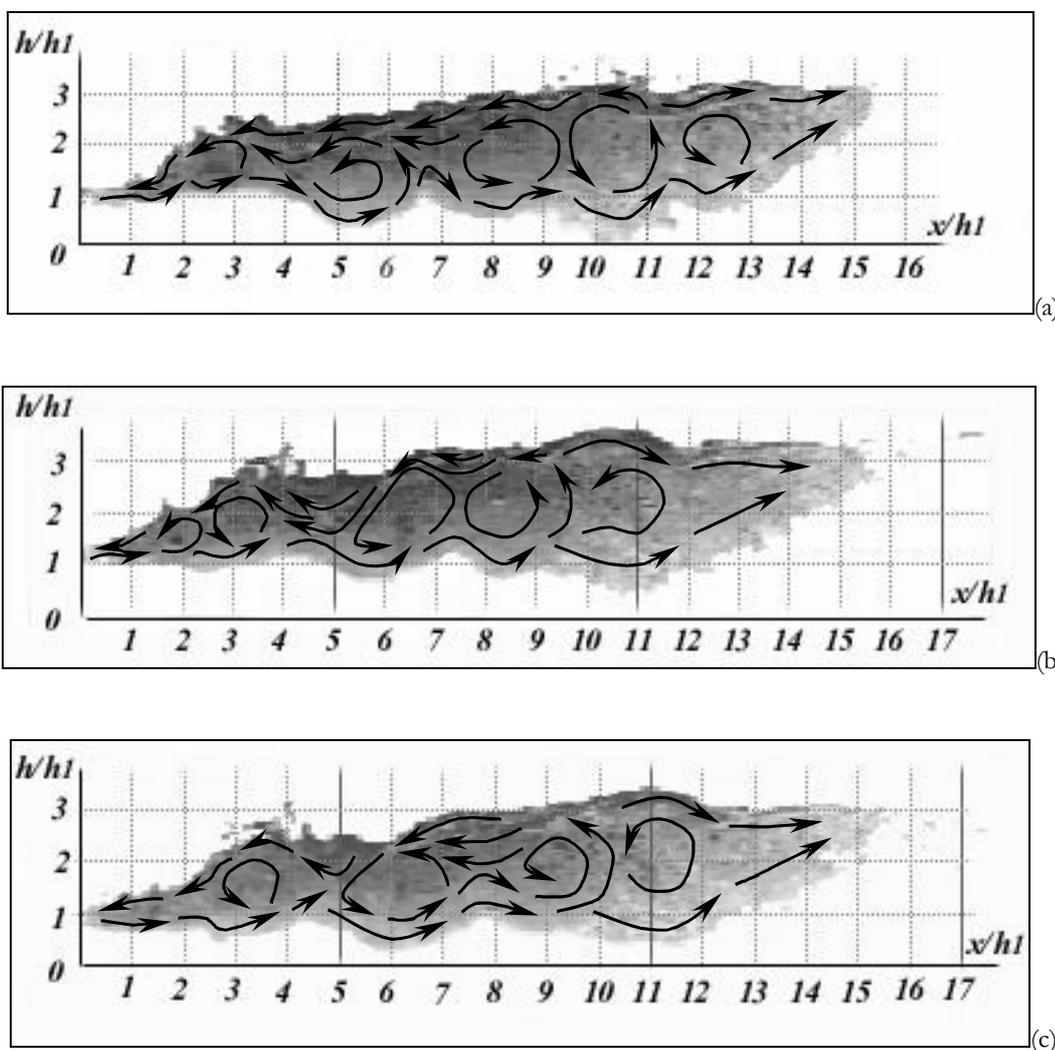
É possível visualizar que o escoamento na parte superior do ressalto, apresentado primeiramente pelos perfis de velocidades de Rouse et al. (1959), Rajaratnam (1965.b) e mais tarde Hornung et al. (1995), penetra no escoamento, no início do ressalto, causando a primeira fonte de vorticidade. A partir 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 ocorre 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) início e caracterização dos turbilhões; (b) interação onda – turbilhão; (c) início do processo de acoplamento entre turbilhões vizinhos.
Figura 15 - Fenômeno de interação entre ondas superficiais – turbilhões no interior do ressalto para número de Froude 2,9.

Análise das variações de níveis 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 (Figuras 16 a 18), para cada valor do número de Froude ensaiado.

Assim, foram verificadas as tendências nas posições $(X/(Y_2-Y_1))$ referidas 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 e;
- dos turbilhões encostarem junto ao fundo com especial atenção para as posições 3, 4 e 5, propiciando pontos de maior probabilidade de ocorrência de cavitação junto ao fundo da bacia.

Foi também observado um comportamento em que, à medida que as flutuações da linha de água da superfície tendem a diminuir de amplitude, as flutuações do perfil inferior do rolo tendem a aumentar.

Outra constatação dessa técnica de visualização é a tendência de diminuição do núcleo potencial (escoamento não perturbado ou não aerado). Uma sugestão para abordagem de todas as questões anteriormente citadas é mostrada na Figura 19 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 19 além de apresentar os valores obtidos para profundidades do escoamento, para os três números de Froude, sugere duas curvas:

- uma curva média que delimita o escoamento aerado do não aerado, auxiliar na determinação da concentração de ar ao longo do ressalto e;
- uma curva ajustada para o perfil médio do ressalto, auxiliar no dimensionamento de estruturas de dissipação (linha contínua).

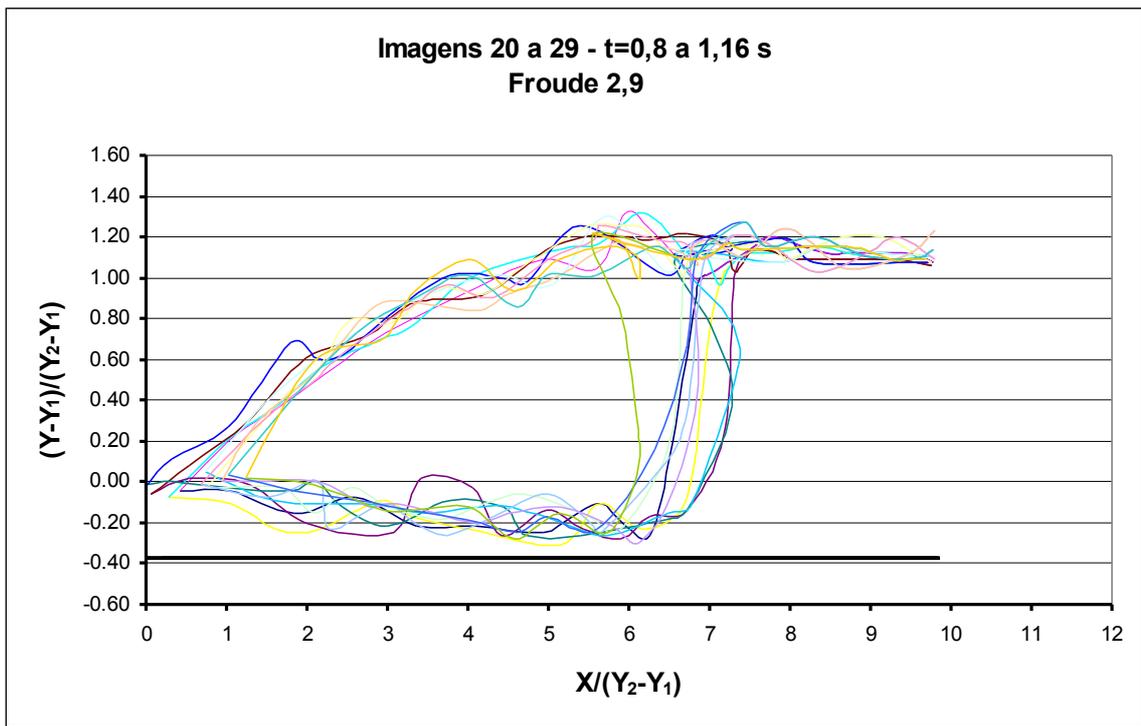


Figura 16 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 2,9.

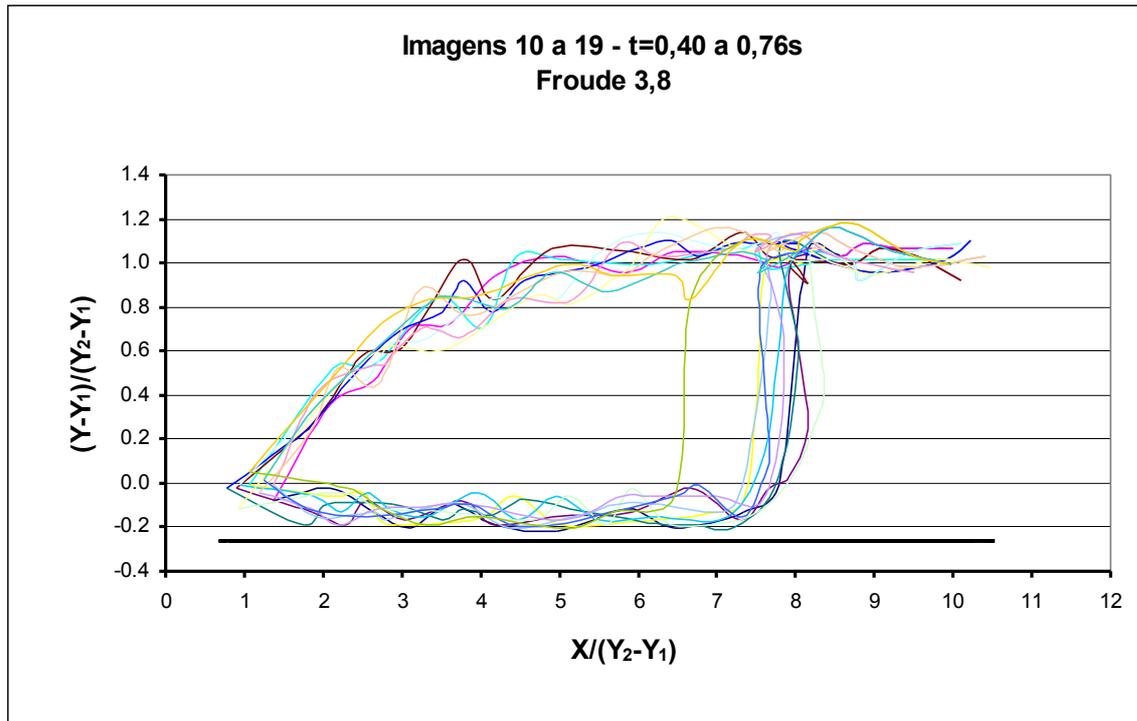


Figura 17 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 3,8.

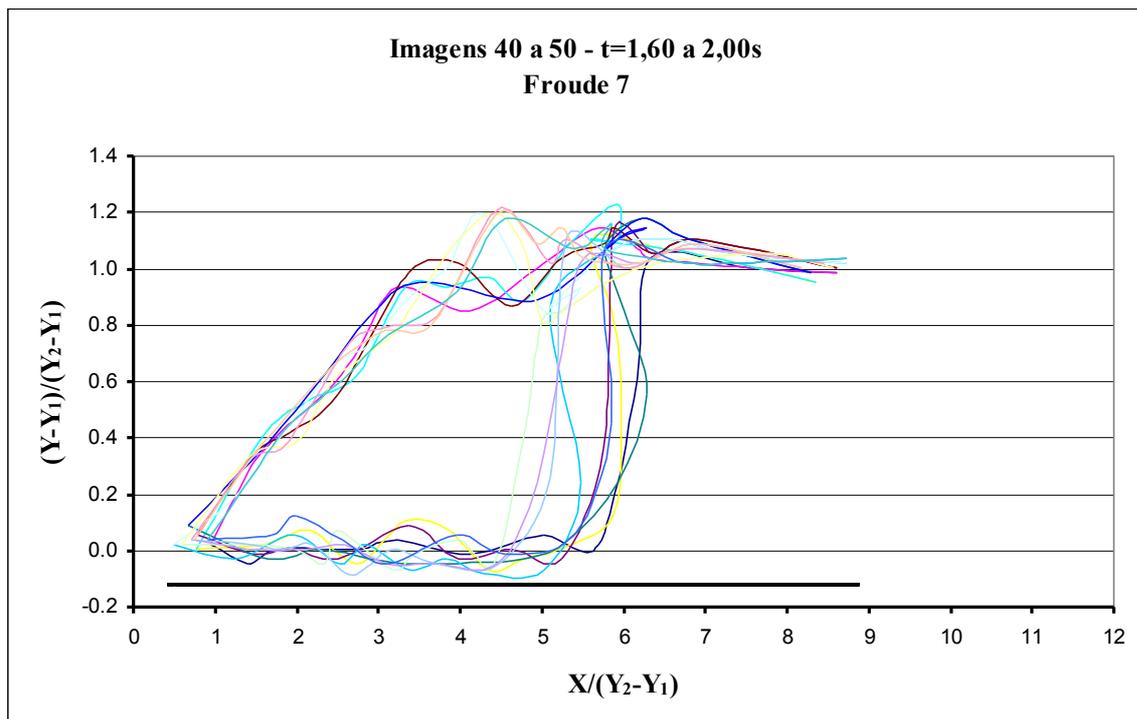


Figura 18 - Análise do desenvolvimento do rolo através da determinação dos níveis instantâneos do perfil do ressalto e do rolo para 10 imagens sucessivas e número de Froude 7,0.

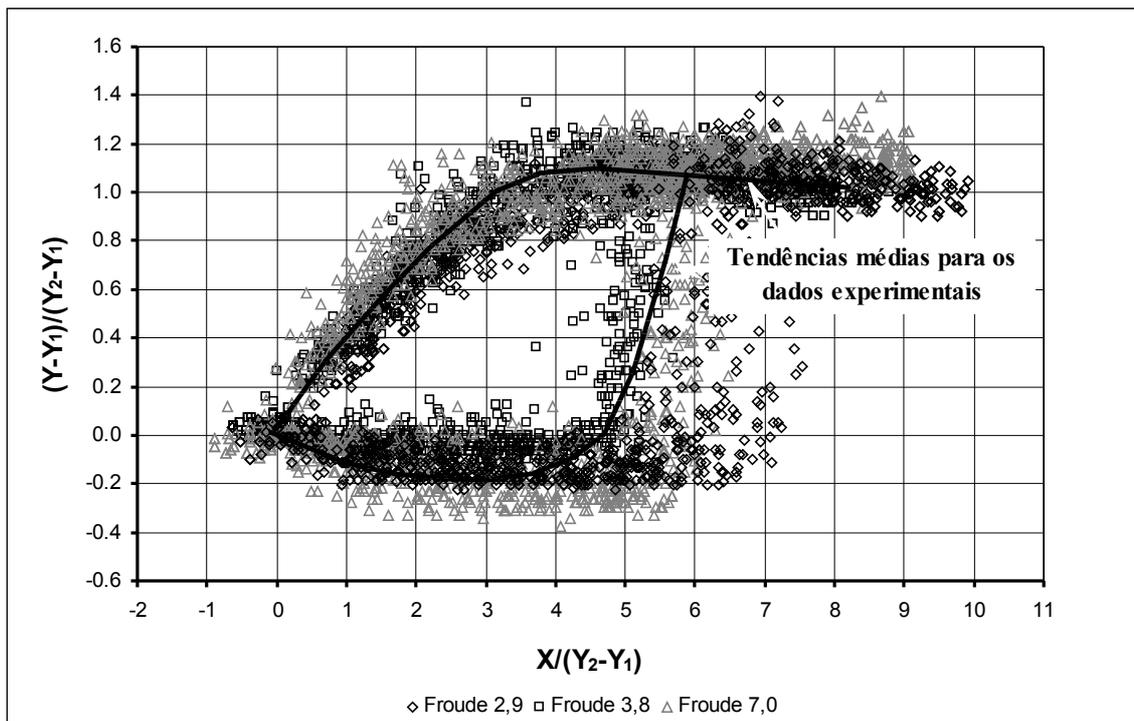


Figura 19 - Profundidades medidas do escoamento potencial (Y_1) e da linha de água da superfície (Y) ao longo do ressalto e sugestão de curvas para dimensionamento.

CONCLUSÕES

O presente trabalho relata os estudos desenvolvidos no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, na área de análise de macroturbulência em estruturas de dissipação de energia, através do estudo da variação instantânea de pressões e níveis.

O trabalho sugere uma seleção de parâmetros para adimensionalização das pressões medidas, em função das características hidráulicas do escoamento, em busca de tendências de comportamento e compara os resultados obtidos com medições efetuadas em estruturas de dissipação montadas em laboratórios e executadas em protótipo. Os resultados mostram que esta adimensionalização pode ser adotada para previsões preliminares de grandezas em sistemas reais.

Com relação à análise de Pressões Médias, é possível identificar características comuns, entre os diferentes conjuntos de dados analisados, no que diz respeito ao padrão de crescimento desses valores, no início do ressalto. É sugerida a adoção de um fator adimensional de submergência do ressalto (T_w/Y_2), que torna os resultados obtidos visivelmente melhor agrupados.

A partir deste agrupamento, é sugerida uma equação de ajuste que considera o efeito do ressalto hidráulico sobre a pressão média terminando onde a posição χ corresponde ao valor 7,9. Assim, a partir dos resultados da pressão média, pode-se adotar a expressão $8(Y_2-Y_1)$ para fornecer o comprimento do ressalto.

Para avaliação e estudo da parcela flutuante da pressão foram efetuadas medições e análises em ressalto hidráulico a jusante de vertedor, para uma faixa de números de Froude compreendida entre 4,5 e 10,0.

Observa-se que os valores de Coeficientes de Pressão diminuem, gradativamente, à medida que o número de Froude aumenta. As posições em que ocorrem os C_p máx avançam ao longo do comprimento do ressalto com o crescimento do número de Froude de maneira semelhante ao que ocorre com as posições onde a perda de energia, ocasionada pelas flutuações de pressão no ressalto hidráulico, tende a zero.

Visando agrupar a apresentação de resultados de flutuações de pressão no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico é possível utilizar o mesmo fator adimensional de submergência do ressalto, já sugerido para a pressão média.

Através dos ajustes em forma de equações sugeridos neste trabalho, pode-se observar que a influência do

ressalto sobre a flutuação de pressão termina na posição correspondente ao valor 8,25 do parâmetro χ . Este resultado é semelhante ao proveniente da análise efetuada com a pressão média.

Os ajustes de curvas em forma de equações, baseados em dados de modelos reduzidos, apresentam satisfatória concordância com os dados de protótipo, apesar de as estruturas possuírem diferenças significativas em suas características geométricas e, inclusive, no que diz respeito à existência de acessórios (comporta).

Quanto ao emprego do sistema de visualização das características do escoamento em um ressalto hidráulico, formado a jusante de comporta, com enfoque para solução de baixo custo, conclui-se que foi possível obter resultados de boa qualidade.

No que diz respeito à descrição visual do fenômeno, é possível identificar os turbilhões acoplando-se e apresentando uma zona de influência maior do que os outros turbilhões independentes. Nota-se, também, a existência de uma geração localizada de instabilidade da superfície da linha de água que é o início da formação de ondas sobre a superfície, descrita com maior detalhe em GOMES, (2000).

Percebe-se um processo de interação ondas – turbilhões junto à superfície da água, que faz parte de seu próprio crescimento e movimentação. Neste processo, os eixos transversais dos turbilhões realizam movimentos nas direções horizontal e vertical, resultado da formação e quebra de ondas na superfície da linha de água do ressalto. A formação dessas ondas resulta da movimentação ascensional dos turbilhões. As ondas quebram e são reintegradas ao escoamento causando o movimento descendente do turbilhão que a gerou, o que causa, por sua vez, o ascensional do seu sucessor. Este comportamento se prolonga até o final do ressalto, onde os turbilhões se dissipam em forma de ondas. Na medida em que as flutuações da linha de água da superfície do ressalto hidráulico tendem a diminuir de amplitude, as flutuações do perfil inferior do rolo tendem a aumentar.

AGRADECIMENTOS

Os autores desse trabalho agradecem o apoio financeiro recebido pela FINEP, FAPERGS, PROPESQ e CAPES, e também o apoio dos pesquisadores e entidades (FURNAS), que cederam seus dados.

REFERÊNCIAS

- AKBARI, M. E., MITTAL, M. K. ET PANDE, P. K. (1982). Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps. *Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures*, Coventry, England. BHRA Fluid Engineering. pp.: 87-96, Paper C1
- BAKHMETEFFF, 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.
- BAKHMETEFFF, 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*”, (I-PH). 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.
- FIOROTTO, V. ET RINALDO, A. (1992). “*Turbulent pressure fluctuations under hydraulic jumps.*” *Journal of hydraulic research*, IAHR, Vol.: 30, No.: 4, pp.: 499-520.
- FRENCH, R.H. (1987), “*Open-Channel Hydraulics*”, *McGraw-Hill Co*, p.75-111.
- GOMES J. F. (2000) Visualização de escoamento macroturbulento- Ressonância hidráulica a Jusante de uma comporta. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação de Recursos Hídricos.
- 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.
- LOPARDO, R. A. (1993). *Stilling basin pressure fluctuations*. 18 p. comunicação pessoal.
- LOPARDO, R. A. (1987). "Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico." *Revista latino americana de hidráulica*, No.: 2, pp.: 109-154.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J. C. et Henning, R. E. (1987). "Modelling techniques for preventing cavitation in structures submerged in hydraulic jumps." *Proc., AIRH Congress LAHR*, Lausanne Switzerland. pp.: 177-182.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J. C. et Vernet, G. F. (1982). "Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump." *Proc., International conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures*, Coventry, England. BHRA Fluid engineering. pp.: 109-121, Paper C3.
- LOPARDO, R. A., DE LIO, J. C. et Vernet, G. F. (1984). "Model-prototype comparison on pressure fluctuations in hydraulic jump energy dissipators." *Proc., Symposium on scale effects in modelling hydraulic structures*, Esslinger, Studgard: H. Kobus. pp.: 1-5.
- LOPARDO, R. A. ET HENNING, R. E. (1985). "Experimental advances on pressure fluctuations beneath hydraulic jumps." *Proc., 21st LAHR Congress*, Melbourne, Australia. pp.: 634-638.
- LOPARDO, R. A. (1986). Apunte sobre Flutuaciones Macroturbulentas de Presión, Medición, Análisis y Aplicación al Resalto Hidráulico. In *Apostila do Curso de Turbulência, Cavitação e Aeração de Fenômenos Hidráulicos*. São Paulo, p. 45.
- LOPARDO, R. A., VERNET, G. F. ET CHIVIDINI, M. F. (1985). "Modelling the behaviour of high head hydraulic jump energy dissipators under flood conditions." *Proc., 2nd International Conference on the Hydraulic of Floods & Flood Control*, Cambridge, England. BHRA, The fluid engineering center. pp.: 313-323, Paper G1.
- MARQUES, M. G., DRAPEAU, J. AND VERRETTE, J. L. (1994). Análise da flutuação de pressão provocada pela formação de um resalto hidráulico a jusante de vertedouros. *Proc., X Seminário Curso do Centro Inter americano de Estudos Avançados dos Recursos de Água*, Salvador - Bahia- Brasil. Universidade Católica do Salvador. pp.: 129-149.
- MARQUES, M., DRAPEAU, J. e VERRETTE, J.L. (1997), "Flutuação de pressão em um resalto 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 Resalto Hidráulico a Jusante de Vertedouro. XVI-II Congresso Latino Americano De Hidráulica Oaxaca, México, Outubro, 1998.
- MARTINEZ, C. B.; FARIA, E. M.; MARQUES, M.G. E NASCIMENTO FILHO, J. (2001)- Estudo de Motorização de Mecanismos de Transposição de Peixes - Argentina).
- FARIA, E. M.; MARTINEZ, C. B.; MARQUES, M. G. E VIEIRA, I. L. (2001)- Utilização de Anemômetro Laser Doppler em Estudos De Estruturas Hidráulicas, - Argentina.
- MARQUES, M.G; GOMES, J., TEIXEIRA D. E ENDRES, L. A. M. (2001) Variação da densidade no interior do resalto hidráulico - XIV Simpósio Brasileiro de recursos Hídricos – Aracaju – SE - Novembro de 2001.
- MARQUES, M. G, GOMES, J. F. E ENDRES, L. A. M.. (2000) Oscilação da posição inicial do resalto hidráulico e o campo de pressões na soleira de bacias de dissipação – V Simpósio de recursos Hídricos do Nordeste 21 a 24 de novembro de 2000.
- TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G.; E ENDRES, L. A. M. (2000) Estimativa das pressões extremas junto ao fundo em uma bacia de dissipação por resalto hidráulico (apoio FAPERGS). Pró-Reitoria de Pesquisa (PRO-PESQ-UFRGS). Porto Alegre, Setembro de 2000.
- MARQUES, M. G; WEILLER C. TEIXEIRA, E. D. E ENDRES, L. A. M. (2000) Adimensionalização de flutuações de pressões em bacias de dissipação por resalto hidráulico – I Congresso sobre Aproveitamento e Gestão de Recursos Hídricos em Países de Idioma Português – Rio de Janeiro – RJ- abril de 2000.
- MARQUES, M. G; ALMEIDA, F. M. E ENDRES, L.A. M. (1999) Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por resalto hidráulico - XIII Simpósio Brasileiro de recursos Hídricos – Belo Horizonte – MG - Novembro de 1999.
- GOMES, J. F.; ENDRES, L. A. M. E MARQUES, M. G. (1999) Visualização de escoamento macroturbulento em um resalto Hidráulico” XIII Simpósio Brasileiro de recursos Hídricos – Belo Horizonte – MG - Novembro de 1999.
- 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), “Ações 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*.
- PINTO et al. 1982. Análise Experimental da Flutuação de Pressão na Base de um Ressalto Livre e Afogado. In: *XIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica*. p. 182-194;
- RAJARATNAM (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. (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”, *J. Hydraulics Div., Proc. Am. Soc. Civil Engrs.* 91, HY4, p.71-96.
- 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”, *LAHR, 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. (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*.
- RESCH, F.J. e LEUTHEUSSER, H. J. (1974), “Bubbly Two-Phase Flow in Hydraulic Jump”, *J. Hydraulics Division*, V100, No. HY1, p.137-149.
- RESH, F. J. e LEUTHEUSSER, H. (1972), “Reynolds Stress Measurements in Hydraulic Jumps”, *J. of Hydraulic Research*, V.10, no. 4, p.409-430.
- 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”, *Habilitationschrift, Mitteilung*, V.59, *Institut für Wasserbau und Wasservirtschaft, TU Berlin* apud HAGER, W.H. (1992), “Energy Dissipators and Hydraulic Jump”, *Water Science and Technology Library*, Kluwer Academic Publishers, p.5-44.
- TOSO et al 1988. *Extreme Pressure in Hydraulic Jump Stilling Basins. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, v.114, n. 8, p. 829-843;
- 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”, *LAHR, 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.

Analysis of Macroturbulence in Energy Dissipation Structures Using the State of Variation of Pressures and Levels

ABSTRACT

Knowledge concerning the energy dissipation process in channels with hydraulic jumps necessarily includes determining the characteristics of longitudinal distribution of pressure in bottom flow and its range of amplitude, as well as the analysis of the water level fluctuations with discharge. The present paper describes the studies developed by the Instituto de Pesquisas Hidráulicas (Hydraulic Research Institute) of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Federal University of Rio Grande do Sul) concerning the analysis of macroturbulence in energy dissipation structures by studying the instantaneous variation of pressure and level. Specifically, the study proposes a group of parameters to render the pressures measured non-dimensional depending on the hydraulic characteristics of flow seeking

behavior trends and it compares the results achieved with the measures performed in prototypes of dissipation structures set up in laboratories. The results show that this non-dimensioning can be adopted for preliminary forecasts of variables in actual systems. Measuring was performed in a hydraulic jump downstream from the outflow for Froude numbers between 4.5 and 10.0. A system to visualize the characteristics of the hydraulic jump downstream from a lock is presented emphasizing a low-cost solution that provides good quality results.

Key Words: hydraulic jump, pressure fluctuation, energy dissipation.