

Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico

Resultados Preliminares

E. F. N. Trierweiler, IPH; E. D. Teixeira, IPH; A. A. A. Mees, IPH; R. A. Wiest, IPH; M. Dai Prá, IPH; M. G. Marques, IPH; L. A. M. Endres, IPH; R. P. Feraudy, FURNAS; e A. V. B. Canellas, FURNAS;

Resumo - Este trabalho é parte do projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Análise da Macroturbulência em Dissipadores por Ressalto Hidráulico”, e apresenta os resultados dos estudos realizados a partir do contrato firmado entre Furnas Centrais Elétricas S.A. e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS) de acordo com a lei nº 9.991 de 24 de julho de 2000. Esta pesquisa tem o objetivo de implementar a análise da macroturbulência em dissipadores por ressalto hidráulico, a fim de orientar o dimensionamento dos mesmos, estudar o efeito da escala de estudos em modelos reduzidos e estimar valores de pressão com diferentes probabilidades de ocorrência junto ao fundo de bacias de dissipação. Serão apresentados os resultados preliminares de estudos sobre o efeito da utilização de condutos flexíveis em medições de pressão em ressalto hidráulico, sobre a influência do grau de afogamento na determinação de pressões extremas e sobre o estudo de correlação cruzada e análise bivariada entre tomadas de pressão em bacias de dissipação por ressalto hidráulico.

Palavras-chave— análise bivariada; bacias de dissipação; macroturbulência; pressões extremas; ressalto hidráulico.

I. INTRODUÇÃO

O ressalto hidráulico é um fenômeno caracterizado pela passagem de um escoamento do regime super-crítico (Froude > 1) para o regime sub-crítico (Froude < 1) sendo este escoamento bifásico e altamente aerado. Essa passagem é acompanhada de um alto grau de turbulência, provocando

significativa perda de carga. Parte da energia cinética é transformada em energia potencial, provocando uma brusca mudança na evolução do nível da água.

O ressalto hidráulico tem sido utilizado com diferentes propósitos, tais como dissipar energia cinética a jusante de estruturas hidráulicas (vertedouros e comportas de fundo), promover aeração de escoamentos em instalações de abastecimento de água e misturar produtos químicos em meios fluidos, entre outros.

Este fenômeno hidráulico tem despertado interesse desde o século XV e, provavelmente, Leonardo da Vinci tenha sido o primeiro pesquisador a realizar observações (O'Malley [7]). Entretanto, o primeiro estudo sobre o ressalto hidráulico, propriamente dito, foi realizado por Bidone em 1820, sendo que Bélanger em 1828 fez o primeiro estudo analítico para determinar a relação entre as alturas conjugadas através dos princípios de conservação de energia e quantidade de movimento.

É de consenso geral que o ressalto hidráulico é acompanhado de intensas flutuações de pressão e de velocidade que possuem um papel decisivo na dissipação da energia. Estas flutuações podem causar danos significativos à estrutura de dissipação por problemas ligados à fadiga, cavitação, ressonância, sobre-pressão e variação de pressão e provocar erosões no leito a jusante do rio. O conhecimento da distribuição das flutuações de pressão e dos valores extremos é importante para compreender o processo da dissipação de energia e para o dimensionamento de estruturas mais eficientes, sendo de grande interesse para o engenheiro de obras hidráulicas. O uso de modelos em escala reduzida pode auxiliar na determinação destas características sendo muito importante na fase de projeto de estruturas hidráulicas. A comparação entre dados obtidos em modelos e protótipo permite que se determine a existência de possíveis efeitos de escala.

O estudo das características turbulentas do interior do ressalto hidráulico teve seu início em meados do século XX, com a utilização de instrumentos que possibilitavam a aquisição de dados com uma frequência elevada. Desde então, começaram os estudos das características estocásticas da dissipação de energia. Os estudos mais recentes buscam a compreensão dos processos turbulentos associados à dissipação de energia (Marques *et al* [4]), aos esforços sobre as estruturas (Pinheiro [11]) e a previsão de valores extremos de pressão em bacias de dissipação (Teixeira [12], e Teixeira *et al* [19] e [20]).

Este trabalho foi apoiado por Furnas Centrais Elétricas S.A.

E. F. N. Trierweiler é Mestrando do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (e-mail: edtrier@yahoo.com.br).

E. D. Teixeira é Doutorando e Mestrando do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (e-mail: engeder@terra.com.br).

A. A. A. Mees é aluno do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS (e-mail: alexandremees@gmail.com).

R. A. Wiest é Mestrando do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (e-mail: rafawiest@gmx.net).

M. Dai Prá é Doutorando e Mestrando do Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (e-mail: mdaipra@yahoo.com.br).

M. G. Marques é Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (e-mail: mmarques@iph.ufrgs.br).

L. A. M. Endres é Professor Adjunto do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH/UFRGS (e-mail: endres@iph.ufrgs.br).

R. P. Feraudy é Engenheiro Civil do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de FURNAS (e-mail: rogerpff@furnas.com.br).

A. V. B. Canellas é Engenheira Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A. (e-mail: alba@furnas.com.br).

Praticamente inexistem estudos sobre efeito de escala na determinação das pressões extremas que ocorrem em bacias de dissipação por ressalto hidráulico através de medições efetuadas em laboratório, assim como, são raros estudos comparativos entre dados de pressão “instantânea” aquisitadas em modelo reduzido e protótipo, apesar do grande interesse envolvido nestas determinações.

II. INFLUÊNCIA DA UTILIZAÇÃO DE CONDUTOS FLEXÍVEIS EM MEDIÇÕES DE PRESSÃO EM RESSALTO HIDRÁULICO

Freqüentemente não é possível a instalação de transdutores de pressão faceando o contorno sólido das estruturas investigadas, sendo assim, se faz necessária a utilização de condutos unindo-os à tomada de pressão.

Existem dúvidas em relação à influência da utilização de condutos entre as tomadas de pressão e os aparelhos de medição, principalmente no que se refere aos materiais utilizados, diâmetro e o comprimento total do conduto. É certo que comprimentos exagerados da mangueira entre a tomada de pressão e o transdutor tem efeitos “amortecedores” sobre os valores reais de pressão. Akbari [1], por exemplo, comenta que os valores de flutuação de pressão começam a ser afetados de forma significativa para comprimentos de mangueiras próximos a 1,0 m. O autor adotou em seu estudo um comprimento de mangueira da ordem de 0,50 m. Lopardo [3] estudou a influência do comprimento, diâmetro e materiais utilizados na conexão entre a tomada de pressão e os sensores. Através da análise do espectro de energia, das freqüências características do fenômeno e dos valores extremos relacionados a uma probabilidade de ocorrência, o autor propôs que sejam utilizados condutos com comprimentos inferiores a 0,55 m. Segundo Lopardo [3], os resultados experimentais demonstraram que, para pressões máximas inferiores a um metro de coluna d’água, os tubos plásticos com 5 mm de diâmetro interno e 7 mm de diâmetro externo apresentam resposta idêntica às conexões com tubos absolutamente rígidos. Entretanto, o próprio autor concorda que há necessidade de maior verificação dessas afirmações.

Na pesquisa em que este trabalho está inserido, serão investigados a influência de diferentes materiais, diâmetros e comprimentos de conduto nos valores das pressões e das flutuações de pressão. Os comprimentos propostos são de 5, 10, 25, 50, 100, 150 e 200 cm sendo os condutos produzidos em nylon, PVC, PVC-Silicone e cobre, nos diâmetros comercialmente encontrados. O presente trabalho apresentará os resultados preliminares desse estudo para os condutos de PVC, ou comercialmente PVC-Cristal, nos diâmetros internos de 1/4” e 5/16” e espessura de parede igual 1,5mm.

A. Metodologia

O ressalto hidráulico estudado foi formado a jusante de uma comporta de acrílico, em um canal com paredes de vidro possuindo 0,45 m de largura e 0,55 m de altura sendo que, nas seções de ensaio, o canal apresenta o fundo em acrílico. Trata-se de um ressalto hidráulico estável, com número de Froude na seção rápida entre 4,5 e 9,0, conforme a classificação apresentada por Peterka [10] para o ressalto

hidráulico. Neste trabalho foram medidas pressões instantâneas em 3 tomadas de pressão, possuindo 2 mm de diâmetro, posicionadas no eixo central do canal. As tomadas de pressão foram posicionadas de forma a abranger as posições de maior flutuação de pressão (desvio padrão) no ressalto hidráulico que, segundo Marques *et al* [4], situa-se próxima à posição adimensionalizada 1,75.

Os transdutores de pressão utilizados são da marca Hytronic, modelo TM25, com faixa de trabalho de 2 psi (1,4 m) e com erro na medida de 3,5 mm de coluna de água. Foi utilizado um transdutor na faixa entre -1,0 a 1,0 psi (-0,70 m.c.a. a 0,70 m.c.a.) na primeira tomada de pressão e dois transdutores de -0,5 a 1,5 psi (-0,35 m.c.a. a 0,70 m.c.a.) nas seguintes. A placa de aquisição de dados utilizada possui uma resolução de 12 bits e 32 canais de entrada, utilizando-se uma freqüência de aquisição dos dados de 100 Hz durante 15 minutos.

B. Análise dos Dados e Resultados Obtidos

Na análise dos dados obtidos, procurou-se verificar influências sobre os valores médios de pressão, o desvio padrão da amostra, o coeficiente de assimetria, o coeficiente de curtose e sobre o espectro de energia de maneira a identificar a influência do comprimento e do diâmetro do conduto nas características estatísticas da amostra coletada.

Constatou-se que os valores de pressão média (Figura 1) não sofreram alteração em função do comprimento das mangueiras e do diâmetro interno dos condutos. No que diz respeito ao desvio padrão (Figura 2), não se verificou uma tendência nítida vinculada aos comprimentos dos condutos, já que a variação do resultado se encontra dentro da faixa constatada através das repetições de ensaios. Entretanto, notou-se que os valores de desvio padrão para o diâmetro interno de 1/4” tendem a ser levemente superiores aos do conduto com diâmetro interno de 5/16”. Verifica-se que os valores de assimetria (Figura 3) tendem a diminuir, para as posições referentes a primeira e a segunda tomada de pressão, em função do comprimento dos condutos. Uma análise em relação aos diâmetros não é tão evidente como no caso do desvio padrão. O coeficiente de curtose (Figura 4) não apresenta variações significativas em função do comprimento e do diâmetro interno dos condutos.

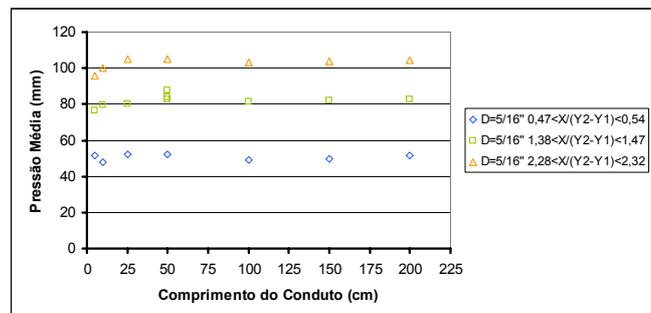


Figura 1. Pressão média em função do comprimento dos condutos para o conduto de 5/16” de diâmetro interno nas 3 tomadas de pressão.

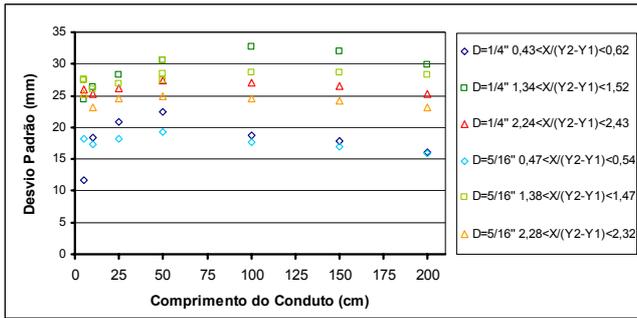


Figura 2. Desvio padrão em função do comprimento dos condutos.

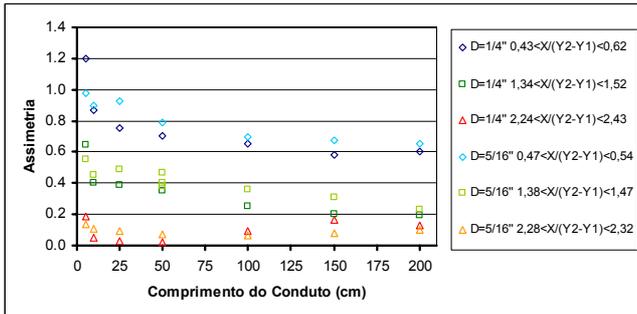


Figura 3. Coeficiente de assimetria em função do comprimento dos condutos.

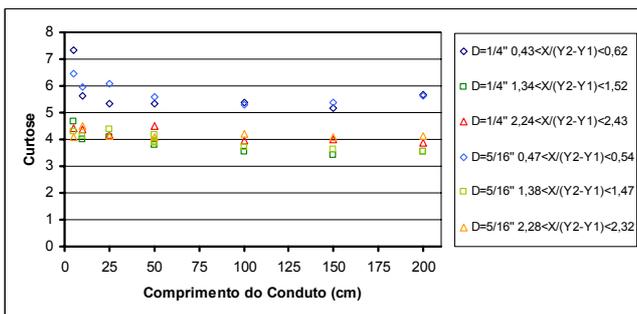


Figura 4. Coeficiente de curtose em função do comprimento dos condutos.

Verificou-se que comprimentos menores de condutos tendem a “amplificar” valores de frequência dominantes referentes à flutuação de pressão. Isso nos leva a crer que medições com condutos extensos não seriam capazes de representar as maiores frequências, sendo essas apenas percebidas com a utilização de condutos curtos. Verificou-se que os condutos de comprimentos menores apresentam espectros com frequências dominantes na faixa de 15 a 20 Hz. A bibliografia a respeito afirma que as frequências dominantes no ressalto hidráulico estão dentro de faixas bem inferiores (Lopardo [3], Ortiz [17]). O ruído existente no sistema não possuía intensidade suficiente para causar influência sobre o sinal.

Através de um acelerômetro constatou-se que a instalação experimental apresentava vibrações em frequências próximas de 17,5 Hz, 22 Hz, 36 Hz e 44,5 Hz. As frequências de 17,5 Hz e 22 Hz são frequências próximas aos picos dos espectros verificados para os menores comprimentos de conduto. No entanto, não existem evidências suficientes que justifiquem relacionar as intensidades de energia verificadas em frequências mais elevadas, encontradas para os menores comprimentos de condutos, às frequências atribuídas à vi-

bração da estrutura quando da passagem do escoamento.

A Figura 5 apresenta a comparação dos espectros de energia entre os diâmetros de 1/4” e 5/16”. Nota-se que as frequências associadas aos picos dos espectros se posicionam sobre a mesma faixa, de acordo com o comprimento do conduto, independentemente do diâmetro estudado. Entretanto, pode-se verificar que a intensidade de energia é inferior para o diâmetro de 5/16” em relação ao de 1/4”, levando a crer que o maior volume de fluido no interior do conduto afetaria a propagação das pressões até o transdutor.

Comparando-se os valores de frequências dominantes encontrados (F_d) com o valor encontrado para o “comprimento padrão” (F_0), 5 cm, podemos verificar de uma forma quantitativa o efeito do comprimento do conduto flexível (Figura 6). Verifica-se que para comprimentos superiores a 50 cm as diferenças passam a ser significativas.

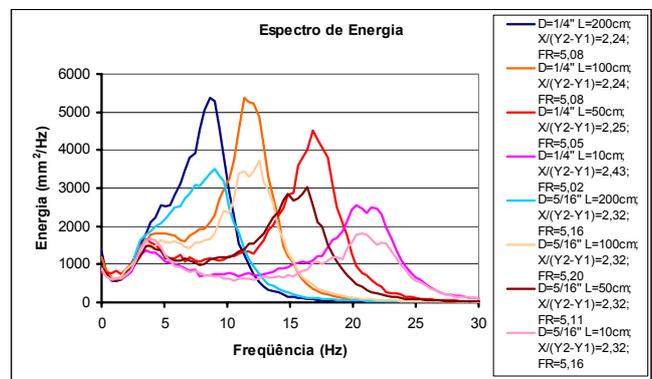


Figura 5. Espectro de energia: comparação entre os diâmetros estudados, 3ª tomada de pressão.

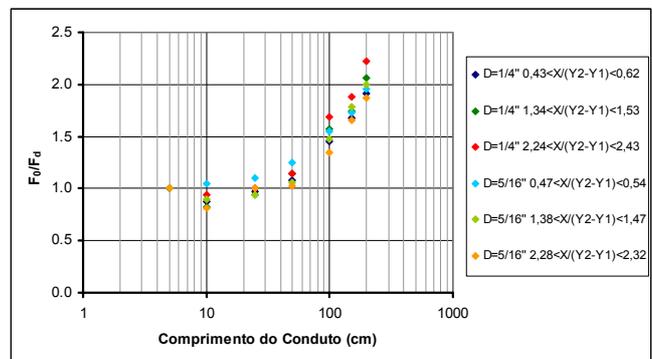


Figura 6. Comparação das frequências dominantes entre os diversos comprimentos de conduto.

III. INFLUÊNCIA DA SUBMERGÊNCIA NA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PARA PRESSÕES EXTREMAS EM BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

De acordo com a classificação apresentada por Hager [2], o ressalto hidráulico a jusante de vertedouros pode ser enquadrado em quatro tipos distintos: ressalto do tipo A, também chamado de ressalto livre, e os ressaltos dos tipos B, C e D, caracterizados de acordo com o grau de afogamento da estrutura a montante. Quando o ressalto formado encontra-se parte na estrutura de dissipação e parte no vertedouro,

“afogando” parcialmente a estrutura, ele é classificado como ressalto do tipo B (B-jump), ou simplesmente ressalto afogado.

No estudo do ressalto afogado, podem ser destacados os trabalhos desenvolvidos por Hager [8] e Ohtsu e Yasuda [5]. Ambos os estudos abordam a obtenção de relações descritivas do fenômeno, como o estabelecimento das alturas conjugadas e o comprimento do ressalto. Entretanto, a influência do afogamento (submergência) no campo de pressões não é abordada.

As primeiras medições da flutuação de pressão no ressalto hidráulico foram realizadas por Elder [13]. Entre os trabalhos de diversos pesquisadores podemos destacar os estudos de Lopardo *et al* [14], Toso e Bowers [6], Endres [8], Piniheiro [11], Marques *et al* [4], [15] e [16] e Teixeira *et al* [20] e [21] para ressaltos livres. Com relação a ressaltos afogados, um dos poucos trabalhos é o de Pinto *et al* [19]. Entretanto, a maior parte destes trabalhos aborda a obtenção de um coeficiente característico da flutuação de pressão (Equação 1), sendo que poucos apresentam os valores de pressão associados a uma probabilidade de ocorrência.

$$C_p = \sigma^2 \frac{2g}{V^2} \quad (1)$$

Onde:

C_p = coeficiente de flutuação de pressão;

σ = desvio padrão;

g = aceleração da gravidade e;

V = velocidade média do escoamento.

Estudos de Lopardo [14] e Marques *et al* [4] indicam que o comportamento das pressões junto ao fundo de uma bacia de dissipação não seguem rigorosamente uma distribuição normal. Isso decorre do fato das distribuições de assimetria e de curtose, verificadas ao longo do ressalto, diferirem, respectivamente, dos valores zero e três, atribuídos a uma distribuição normal.

Teixeira [12] sugere uma metodologia de previsão das pressões junto ao fundo de bacias de dissipação com uma certa probabilidade de ocorrência (Equação 2), considerando as diversas distribuições existentes ao longo do ressalto hidráulico. O autor definiu um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N), determinado a partir dos dados de Endres [8].

$$P_{X\%} = P_X \pm N\sigma_X \quad (2)$$

Onde:

$P_{X\%}$ = pressão estimada com uma certa probabilidade (%) de ocorrência de ser inferior ou igual a um valor em um ponto X no interior do ressalto;

P_X = pressão média no ponto X;

N = coeficiente estatístico para uma determinada probabilidade e;

σ_X = desvio padrão no ponto X.

Marques *et al* [16] apresentam a aplicação da metodologia proposta por Teixeira [12]. Neste trabalho os autores apresentam os valores de pressões atuantes em uma bacia de

dissipação a partir da determinação do coeficiente de distribuição de probabilidade (N) para seis diferentes probabilidades de ocorrência de pressões inferiores ou iguais a um certo valor (99%, 95%, 90%, 10%, 5% e 1%).

A. Determinação do Coeficiente estatístico de Distribuição de Probabilidade (N).

A previsão de valores extremos de pressão em estruturas de dissipação por ressalto hidráulico é dificultada pela existência de diferentes tipos de distribuições de probabilidade na zona de influência do ressalto – Lopardo [14] e Teixeira [12]. Desta maneira, a estimativa dos valores de pressões, associados a uma certa probabilidade de ocorrência, pode ser obtida a partir dos valores médios de pressão e desvio padrão de amostras de modelo reduzido e do conhecimento do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N), calculado a partir da curva de distribuição de frequências acumuladas (Equação 2). Este trabalho propõe a aplicação da metodologia sugerida por Teixeira [12] e [20] em ressaltos afogados à jusante de vertedouros.

Esta metodologia foi empregada aos dados do modelo reduzido na escala geométrica de 1:100 da UHE Porto Colômbia, obtidos quando da realização do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Utilização de Modelos Numéricos e Experimentais para Dimensionamento e Otimização de Bacias de Dissipação”, no LAHE (Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos de FURNAS).

A Figura 7 apresenta a distribuição das tomadas de pressão no modelo reduzido da UHE Porto Colômbia.

Os dados do referido modelo são referentes a ressaltos afogados com diferentes graus de afogamento ou submergência (S). A submergência (S) do ressalto hidráulico (Equação 3) é definida como a razão entre a lâmina d’água sobre a bacia de dissipação (T_w) e a altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (Y_2).

As alturas conjugadas para o ressalto hidráulico afogado foram determinadas utilizando a equação proposta por Hager [2], Equação 4.

Assim, os valores de N calculados por Teixeira [12] para o ressalto livre a partir dos dados de Endres [8], serão aqui comparados com os dados obtidos para o ressalto afogado do modelo da UHE Porto Colômbia.

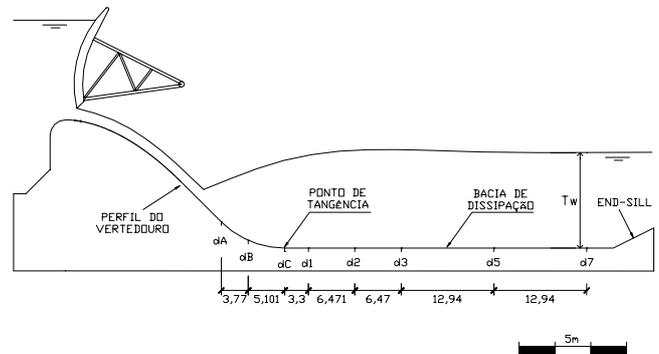


Figura 7. Detalhe do modelo reduzido da UHE Porto Colômbia e suas tomadas de pressão (medidas em escala de protótipo).

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (3)$$

$$Y = 23,5 \left(1 + \frac{3}{2}E\right)^{-2} + \frac{\sqrt{2}(Fr_1 - 3)}{th\left(\frac{5}{2}E\right)} \quad (4)$$

Onde:

Y = relação entre a lâmina d'água sobre a bacia de dissipação e a altura conjugada rápida do ressalto afogado ($Y=Tw/Y_1$);

Y_1 e Y_2 = Alturas conjugadas do ressalto hidráulico;

T_w = lâmina d'água sobre a bacia de dissipação e;

Fr_1 = número de Froude na entrada do ressalto;

$E = e/T_w$;

e = diferença entre o nível de jusante e a cota de início do ressalto (m)

th = tangente hiperbólica.

As Figuras 8 a 11 apresentam os valores do coeficiente estatístico (N) para diversas probabilidades de ocorrência em função da posição adimensionalizada do ressalto. Os pontos com símbolos vazados apresentados nas figuras referem-se às tomadas iniciais do modelo (Tomadas dA, dB e dC, conforme Figura 7), na parte curva do vertedouro. Estas tomadas estão sujeitas aos efeitos do raio de concordância entre o vertedouro e a bacia de dissipação. A existência do perfil do vertedouro impede o “reco” do ressalto devido ao afogamento. Por esta razão, os dados destas tomadas devem ser analisados levando-se em conta estes fatos. Os valores negativos da posição relativa do ressalto ($X/(Y_2 - Y_1)$) indicam que a tomada estava antes do início do ressalto e são aqui apresentados somente para indicar a tendência gerada pela influência do raio de curvatura. Cabe lembrar ainda que conforme Gomes [9], o ponto de início do ressalto sofre uma oscilação de cerca de $0,25(X/(Y_2 - Y_1))$, para o caso de um ressalto livre a jusante de comporta, fato que ocorrerá em menor escala a jusante de um vertedouro.

Observa-se na Figura 8 que os valores de $N_{99\%}$ no trecho reto da bacia (pontos com símbolos cheios) situam-se dentro da nuvem de pontos do ressalto livre, além de apresentarem uma pequena tendência de permanecerem na parte superior da nuvem de pontos. A partir da posição adimensionalizada 3 pode-se considerar o coeficiente N praticamente constante e igual a 2,4. Nota-se ainda uma influência da submergência também na parte inicial do ressalto, onde a lâmina d'água existente devido ao afogamento da estrutura possivelmente faz com que as oscilações de pressões sejam menores. Além disso, deve-se considerar a existência do raio de curvatura que provoca um aumento de pressão média junto ao raio de concordância.

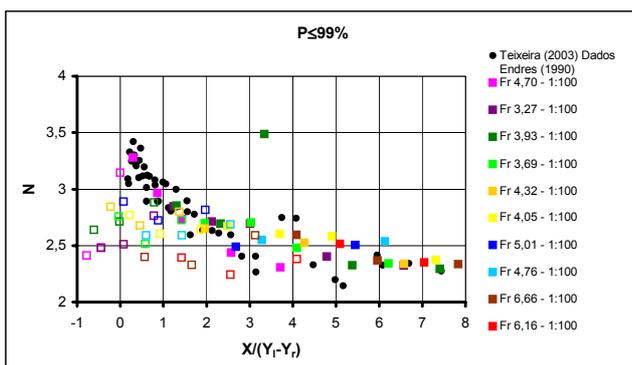


Figura 8. Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 99% de ocorrência, com os dados de Endres [8] e do modelo de UHE Porto Colômbia - escala 1:100, em função da posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

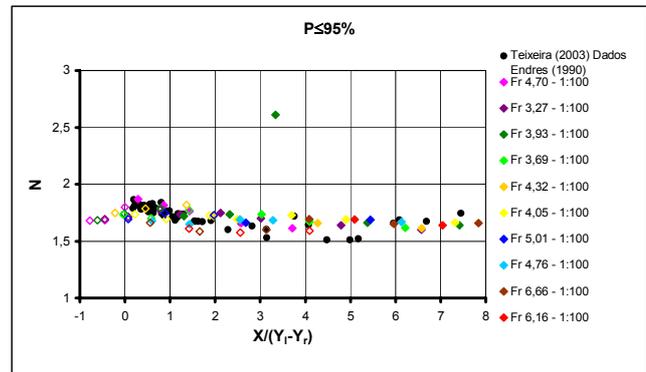


Figura 9. Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 95% de ocorrência, com os dados de Endres [8] e do modelo de UHE Porto Colômbia - escala 1:100, em função da posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

Na Figura 9 é possível notar o mesmo comportamento apresentado na Figura 8 ($N_{99\%}$). No entanto, ocorre uma dispersão bem menor dos resultados, o que permite a consideração de que para esta probabilidade o coeficiente N mantém-se constante, principalmente a partir da posição 1,5. Para $N_{90\%}$ verificou-se dispersão menor dos dados, que variam em uma faixa estreita entre, aproximadamente, 1,2 e 1,4, sendo possível a consideração de um valor constante igual a 1,3 a partir da posição adimensional 1,5.

De modo semelhante ao que ocorre para as pressões com probabilidade de ocorrência de 95% e 90%, o valor do coeficiente $N_{10\%}$ mantém-se, aproximadamente, constante. Contudo, é importante ressaltar que os valores de N apresentam sinal negativo, de maneira distinta ao que ocorria para as probabilidades elevadas. Outro aspecto que deve ser observado é a maior dispersão dos pontos calculados para uma probabilidade de 10% em relação à probabilidade de 90%. Este comportamento deve-se, provavelmente, ao fato de que para pressões menores as variações são mais significativas em relação à carga total sobre as tomadas.

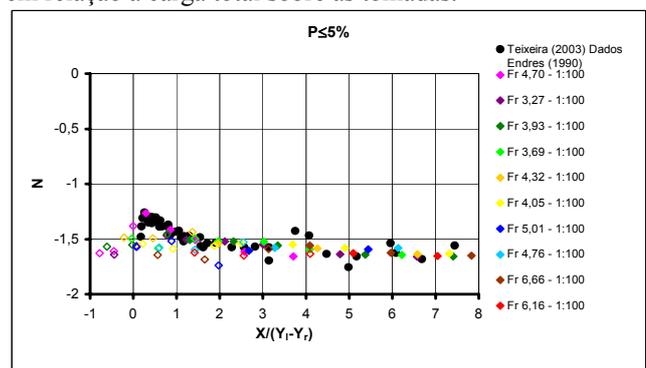


Figura 10. Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 5% de ocorrência, com os dados de Endres [8] e do modelo de UHE Porto Colômbia - escala 1:100, em função da posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

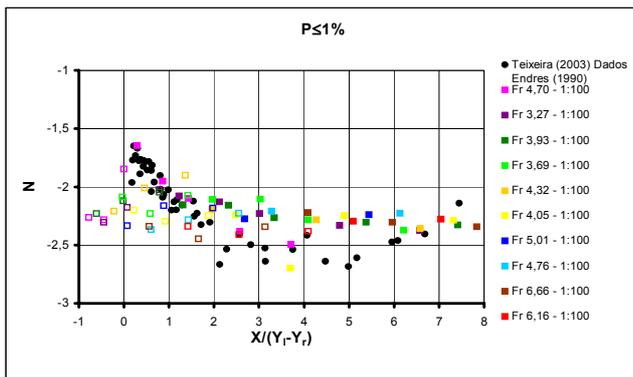


Figura 11. Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 1% de ocorrência, com os dados de Endres [8] e do modelo de UHE Porto Colômbia - escala 1:100, em função da posição adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

Conforme apresentado na Figura 10, verifica-se uma pequena dispersão dos dados para a probabilidade de 5%, sendo que se pode considerar o valor de N constante a partir da posição adimensional 2. É importante ressaltar, entretanto, que, apesar dos dados manterem-se em uma faixa estreita de variação, verificou-se um aumento da dispersão em relação aos resultados para a probabilidade de 10%. Na Figura 11 observa-se que os valores de $N_{1\%}$ no trecho reto da bacia (pontos com símbolos cheios), tal qual o comportamento para as pressões com 99% de probabilidade (Figura 8), situam-se dentro da nuvem de pontos do ressalto livre, apresentando uma tendência de permanecerem acima dos pontos referentes ao ressalto livre. A partir da posição adimensionalizada 2 pode-se considerar o coeficiente N praticamente constante e, aproximadamente, igual a -2,3. A influência da submersão e também do raio de curvatura são visíveis na parte inicial do ressalto, uma vez que os resultados obtidos para as tomadas iniciais (símbolos vazados) estão, em sua maioria, abaixo dos obtidos para o ressalto livre.

Através da análise dos valores do coeficiente N e sua distribuição longitudinal ao longo da bacia de dissipação (pontos cheios, trecho reto, tomadas d1 a d7) verifica-se que os resultados referentes ao ressalto afogado apresentam uma tendência de manterem-se constantes a partir de uma certa posição em função da probabilidade analisada. Observa-se que esta posição situa-se próxima à de máxima flutuação de pressão, que para o ressalto livre seria 1,75 (Marques *et al* [4]). Para efeitos práticos, a variação existente poderia ser desprezada, adotando-se um valor mínimo de -2,3 para a probabilidade de 1% e um valor máximo de 3,3 no caso da probabilidade de 99%. Para efeitos práticos, sugere-se os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Valores sugeridos do coeficiente N para o ressalto afogado.

P%	N Máx.	Intervalo	N - constante	Intervalo
99	3,3	$0 < X/(Y_2 - Y_1) < 3$	2,4	$3 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$
95	1,8	$0 < X/(Y_2 - Y_1) < 1,5$	1,7	$1,5 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$
90	--	--	1,3	$0 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$
10	--	--	-1,3	$0 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$
5	-1,25	$0 < X/(Y_2 - Y_1) < 2$	-1,65	$2 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$
1	-1,7	$0 < X/(Y_2 - Y_1) < 2$	-2,3	$2 < X/(Y_2 - Y_1) < 8$

IV. ESTUDO DE CORRELAÇÃO CRUZADA E ANÁLISE BIVARIADA ENTRE TOMADAS DE PRESSÃO EM BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

O objetivo principal desta pesquisa é estudar o efeito de escala na previsão de valores extremos de pressões junto ao

fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Para o desenvolvimento deste trabalho, serão utilizados dados de pressão “instantânea” obtidos a partir de uma campanha de medições realizada na UHE Porto Colômbia (pertencente a FURNAS), em 1996, e dados coletados nos modelos reduzidos em diferentes escalas, 1:100, 1:50 e 1:30, instalados no LAHE.

O efeito escala será analisado, preliminarmente, através de análises estatísticas fundamentais, para diferentes condições de ressalto hidráulico, através dos dados medidos nos diferentes modelos como no protótipo.

Em paralelo, pretende-se trabalhar com análise de correlação cruzada (bivariada), caracterização da interdependência entre as tomadas de pressão e na determinação do coeficiente de correlação entre as diferentes amostras para um mesmo tipo de escoamento.

A. Metodologia

A metodologia de análise do efeito de escala envolvido em medições de pressão efetuadas em estruturas de laboratório será decomposta em duas etapas básicas. Na primeira, será realizada uma análise estatística fundamental, que é habitualmente definida com base na determinação dos momentos estatísticos.

Para verificar o comportamento dos dados e também comparar a distribuição longitudinal dos momentos estatísticos encontrados nos diferentes modelos com as medições efetuadas no protótipo, os valores obtidos serão adimensionalizados através das características do escoamento, conforme adimensionalização apresentada em Marques *et al* [15] e Teixeira [12]. Os dados de pressão da UHE Porto Colômbia (protótipo) servirão como controle para determinar o efeito de escala provocado pela redução no tamanho da estrutura.

Na segunda etapa, as ferramentas a serem utilizadas para a análise, descrição e comparação dos dados obtidos no protótipo e em laboratório ainda não estão totalmente estabelecidas. Entretanto, esses instrumentos de análise serão delineados de forma a atingir as metas previamente traçadas. Algumas análises estão sendo realizadas, podendo-se citar:

1) Determinação da interdependência entre as tomadas de pressão para um mesmo escoamento

Este estudo está sendo realizado através da combinação das amostras de dados de pressão obtidas em duas tomadas, simultaneamente, para um mesmo tipo de escoamento (mesma vazão). Através da comparação da distribuição entre duas tomadas pode-se obter uma noção da interdependência entre pressões em dois pontos consecutivos do ressalto, ou resumidamente na figura Figura 12.

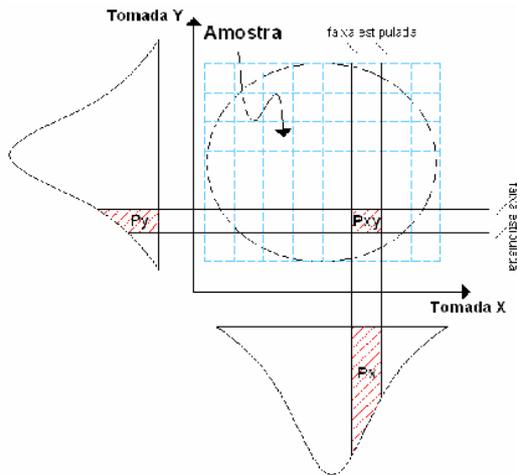


Figura 12. Desenho esquemático da metodologia de determinação de probabilidade conjunta.

A Figura 13 representa graficamente a interdependência entre duas tomadas consecutivas localizadas dentro do ressalto. A área em vermelho representa MENOR interdependência enquanto a área em azul representa o oposto (MAIOR), com outras cores representando valores intermediários. Observa-se que os valores extremos de pressão (tanto os maiores como os menores valores) têm maior influência sobre a ocorrência de pressões em tomada próxima. O mesmo estudo foi realizado com uma defasagem de tempo entre valores de tomadas, representando o tempo necessário para a propagação destes efeitos e observou-se então maior interdependência (maiores áreas em azul) nos resultados obtidos. Os resultados desta análise ainda estão em fase de estudos preliminares.

2) Determinação do coeficiente de correlação entre as diferentes amostras para um mesmo escoamento

Estão sendo determinados os coeficientes de correlação entre as diversas tomadas instaladas ao longo da bacia de dissipação (considerando que as amostras foram obtidas ao mesmo tempo). A aplicação desta técnica pretende determinar a relevância das correlações ao longo do desenvolvimento do ressalto hidráulico na bacia de dissipação.

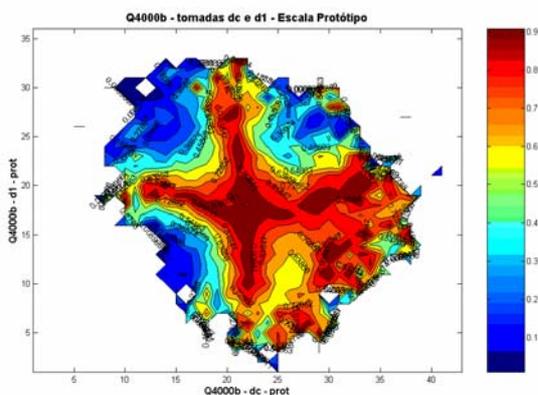


Figura 13 Representação gráfica da interdependência sem defasagem, tomadas dc x d1, para vazão de $Q = 4000^3/s$, medição de protótipo.

3) Análise de correlação cruzada (bivariada) das pressões entre as diferentes posições do ressalto hidráulico para um mesmo escoamento

A análise de correlação cruzada entre duas amostras de dados de pressão descreve a dependência geral dos valores de um conjunto de dados em relação ao outro, no domínio do tempo (Endres [8]). Esta técnica de análise irá apresentar a medição do lapso de tempo em que ocorre a influência dos valores que ocorreram em uma tomada de pressão a montante (denominado “lag”) e também a correlação cruzada máxima positiva entre as duas amostras de dados consideradas. Neste estudo será analisada a relação entre as amostras de pressão “instantânea”, considerando duas tomadas (não necessariamente consecutivas) para uma mesma vazão.

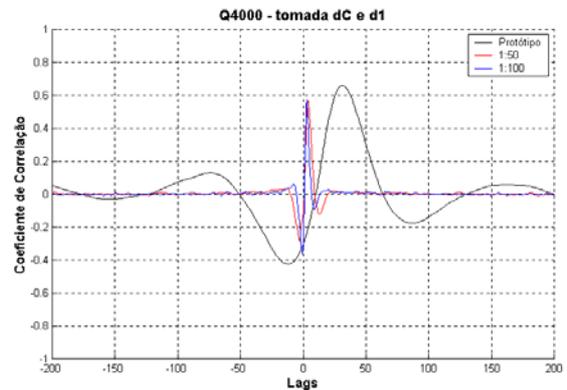


Figura 14. Correlação cruzada para os valores obtidos nas tomadas dC e d1 do protótipo e dos modelos reduzidos (Vazão de protótipo = $4000 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Fr=3,88$).

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No estudo sobre a influência do comprimento de condutos flexíveis em medições instantâneas no ressalto hidráulico verificou-se que para análise de pressões médias, desvio padrão, assimetria e curtose a utilização de diferentes comprimentos de condutos flexíveis de PVC, unindo a tomada de pressão e o transdutor, ocasiona pequena influência sobre os dados medidos. Pode-se sugerir a utilização de condutos flexíveis de PVC com comprimentos inferiores a 50 cm quando se deseja estudar as frequências dominantes do fenômeno. Verificou-se que os espectros de energia relacionados à utilização de comprimentos menores de condutos tendem a apresentar valores de frequência dominantes maiores que os verificados para os condutos mais extensos. As frequências mais elevadas, verificadas para os menores comprimentos de condutos ainda não foram devidamente justificadas, necessitando de um estudo mais aprofundado. Verificou-se que a intensidade, apresentada no espectro de energia, é inferior para o diâmetro de 5/16" em relação ao de 1/4", no entanto, os picos dos espectros permaneceram próximos às mesmas frequências independente do diâmetro do conduto. Está em andamento a continuação desse estudo com a utilização de outros materiais e diâmetros buscando caracterizar melhor a influência da utilização de condutos na medição de flutuação de pressão no ressalto hidráulico.

Os estudos sobre pressões extremas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico são essenciais para o melhor di-

mensionamento da estrutura. O conhecimento do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) visa permitir uma estimativa segura destes valores extremos. É visível, a influência do afogamento (submergência) no valor do coeficiente, principalmente no início do ressalto, junto ao raio de concordância, onde os valores tendem a ser menores que no ressalto livre. Acredita-se que a lâmina d'água existente, devido ao afogamento da estrutura, possivelmente “amortece” as pressões. Tal como os coeficientes apresentados por Teixeira [21], ocorre uma maior variação do coeficiente para as probabilidades extremas (1% e 99%). Todavia, os dados para ambas as probabilidades indicam a tendência a um valor constante com o desenvolvimento do ressalto, como ocorre com as outras curvas.

Os estudos de Correlação Cruzada e Análise Bivariada entre Tomadas de Pressão em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico se encontram em fase preliminar, representando um ferramental necessário e adicional ao estudo do efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressões junto ao fundo da estrutura de dissipação de energia por ressalto hidráulico, sendo parte da tese de doutorado a ser defendida pelo Eng^o Civil Eder D. Teixeira.

Os resultados dos estudos até então realizados podem ser vistos também em Trierweiler *et al* [21] e Wiest *et al* [22].

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Periódicos:

- [1] Akbari, M. E., Mittal, M. K., Pande, P. K., “Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jumps”. in International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, 87-93, 1982.
- [2] Hager, W. H., “B-jump in sloping channel”. Journal of Hydraulic Research 27 (1), pp. 539 – 558, 1989.
- [3] Lopardo, R. A., “Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico”. Revista latino americana de hidráulica, n. 2, p. 109-154, 1987.
- [4] Marques, M. G., Drapeau, J. Verrette, J. L., “Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico”. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos 2 (2), pp. 45-52, 1997.
- [5] Ohtsu, I., Yasuda, Y., “Hydraulic Jump in sloping channels”. Journal of Hydraulic Engineering 117 (7), pp. 905-921, 1991.
- [6] Toso, J. W., Bowers, C. E., “Extreme Pressures in Hydraulic Jump stilling basins”. Journal of Hydraulic Engineering 114 (8), pp. 829-843, 1988.
- [7] O’Malley, C. D., “Leonard’s Legacy” Berkeley and Los Angeles University of California Press, 1965.
- [8] Endres, L.A.M., “Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório”. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 104 p, 1990.
- [9] Gomes, J. F., “Visualização de escoamento turbulento – Ressalto hidráulico a jusante de uma comporta”. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 90 p, 2000.
- [10] Peterka, A J., “Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators”. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25, Denver, 1974.
- [11] Pinheiro, A. A. N., “Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico”. Tese (Doutorado) - submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa. 353 p, 1995.
- [12] Teixeira, E. D., “Previsão dos valores de Pressão junto ao fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico”. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, 116 p, 2003.
- [13] Elder, R. A., “Model-Prototype Turbulence Scaling”. In: IAHR, 9, Dubrovnik. p. 24-31, 1961.
- [14] Lopardo, R. A., Chividini, M. F., Berrilio, D. A., “Effects of Hydraulic Jump Inflow Condition on the Decay of Turbulence in Stilling Basins”. International Symposium on New Technology in Model Testing in Hydraulic Research, India, pp. 111-114, 1987.
- [15] Marques, M. G.; Almeida, F. M. e Endres, L. A. M., “Adimensionalização de Pressões Médias em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico”. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1999.
- [16] Marques, M. G., Endres, L. A.; Teixeira, E. D. e; Trierweiler, E. F. N., “Previsão de pressões extremas junto ao fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico Estudo de caso”. IV Simpósio sobre Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas. Recife/PE, Setembro de 2004;
- [17] Ortiz, J. P., Almeida, F.M., Carvalho, E., Borsari, R.D, “Medições em protótipo de flutuações de pressão na bacia de dissipação da usina de Porto Colômbia”. In: Escola de Primavera - Transição e Turbulência, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Ciências Mecânicas, v.1, p. 293-320, 1998.
- [18] Pinto, L. C. S., Vasconcellos, J. E., Seyssel, R. L., “Análise Experimental da Flutuação de Pressão na base de um Ressalto Hidráulico Livre e Afogado”. XIII Congresso Latinoamericano de Hidráulica. pp. 182-194, 1988.
- [19] Teixeira, E. D., Trierweiler, E. F. N., Endres, L. A. M., Marques, M. G., “Análise das Flutuações de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico”. XXV Seminário de Grandes Barragens, 2003.
- [20] Teixeira, E. D., Trierweiler, E. F. N., Endres, L. A. M., Marques, M. G., “Determinação do Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade para valores extremos de Pressões no Ressalto Hidráulico”. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003.
- [21] Trierweiler, E. F. N., Endres, L. A. M., Mees, A. A. A., Dai Prá, M., Teixeira, E. D., Wiest, R. A., Canellas, A. V. B., Feraudy, R. P., Marques, M. G., “Influência da Utilização de Condutos Flexíveis em Medições de Flutuação de Pressão em Ressalto Hidráulico” - XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - João Pessoa/PB, 20 a 24 de novembro de 2005.
- [22] Wiest, R. A., Teixeira, E. D., Trierweiler, E. F. N., Mees, A. A. A., Dai Prá, M., Endres, L. A. M., Canellas, A. V. B., Feraudy, R. P., Marques, M. G., “Influência da Submergência na Determinação do Coeficiente Estatístico de Distribuição de Probabilidade para Pressões Extremas em Bacias De Dissipação por Ressalto Hidráulico - XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos - João Pessoa/PB, 20 a 24 de novembro de 2005.

Livros:

- [7] O’Malley, C. D., “Leonard’s Legacy” Berkeley and Los Angeles University of California Press, 1965.

Dissertações e Teses:

- [8] Endres, L.A.M., “Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório”. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 104 p, 1990.
- [9] Gomes, J. F., “Visualização de escoamento turbulento – Ressalto hidráulico a jusante de uma comporta”. Dissertação de Mestrado, Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 90 p, 2000.
- [10] Peterka, A J., “Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators”. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25, Denver, 1974.
- [11] Pinheiro, A. A. N., “Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico”. Tese (Doutorado) - submetida para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Técnica de Lisboa. 353 p, 1995.