DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE ESTATÍSTICO DE DISTRIBUIÇÃO DE PROBABILIDADE PARA VALORES EXTREMOS DE PRESSÕES NO RESSALTO HIDRÁULICO.

Eder Daniel TEIXEIRA[1]; Edgar Fernando TRIERWEILER Neto [2];
Luiz Augusto Magalhães ENDRES [3] & Marcelo Giulian MARQUES [4]

Resumo - O conhecimento do processo de dissipação de energia por ressalto hidráulico passa, obrigatoriamente, pela determinação das características da distribuição longitudinal das pressões médias, suas flutuações e seus valores extremos no escoamento.

Este trabalho sugere um método que permite estimar as pressões com diferentes probabilidades de ocorrência em função das características hidráulicas do escoamento, através da determinação de um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidades (N), com o objetivo de obter uma previsão das pressões que ocorrem em sistemas reais.

O presente trabalho faz parte de um projeto realizado em parceira com Furnas Centrais Elétricas S.A. e o Instituto Militar de Engenharia (IME) fazendo parte da pesquisa *Modelos Numérico e Experimental para Dimensionamento e Otimização das Bacias de Dissipação*

Abstract - Mastering the knowledge of the energy dissipation process by means of hydraulic jumps is something that indispensably includes the determination of the characteristics of the longitudinal distribution of average pressures, as well as their fluctuation and extreme values when flow takes place.

Through the determination of a probability statistical coefficient (N) and aiming at a preliminary prospect for the pressures which occur in real systems, this study suggests a method that allows the estimation of pressures which vary or occur differently due to the hydraulic characteristics verified at flow.

[1] Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Tel: +(55) 0XX51 3316 6405, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, engeder@ppgiph.ufrgs.br;
[2]Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Tel: +(55) 0XX51 3316 6405, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, edtrierweiler@ig.com.br;
[3]Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Tel: +(55) 0XX51 3316 6669, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, endres@iph.ufrgs.br e;
[4]Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul IPH/UFRGS, Av. Bento Gonçalves 9500, CEP 91501-970, Tel: +(55) 0XX51 3316 6405, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil, mmarques@iph.ufrgs.br

This study is part of a project carried out in conjunction with Furnas Centrais Elétricas S.A. and the Instituto Militar de Engenharia (IME), being also part of a research named “Numerical and experimental models for the dimensioning and optimization of dissipation basins”.

Palavras-chave - ressalto hidráulico, dissipação de energia, flutuação de pressões.

INTRODUÇÃO

Os engenheiros de obras hidráulicas e os engenheiros calculistas têm grande interesse em conhecer qual a verdadeira grandeza das pressões atuantes sobre a estrutura de dissipação projetada, de maneira que seja possível uma concepção com maior segurança. O conhecimento da distribuição longitudinal das pressões médias, suas flutuações e os valores extremos observados que podem ocorrer no interior do dissipador de energia por ressalto hidráulico é um primeiro passo para a previsão das pressões extremas ali verificadas. A determinação desses valores permite um melhor conhecimento do processo de dissipação de energia no interior do ressalto.

A maior parte das análises de dados encontradas na literatura diz respeito a características apenas das flutuações de pressão, obtidas em instalações de laboratório. Apesar do grande interesse envolvido nestas determinações, para a previsão de esforços extremos são necessárias informações, sobre as pressões médias e o tipo de distribuição de probabilidade dos dados. Estas informações são, normalmente, mais raras nas publicações, principalmente considerando determinações efetuadas em protótipos.

O objetivo deste trabalho é, portanto, sugerir um método de apresentação dos valores da distribuição longitudinal das pressões com diferentes probabilidades de ocorrência no fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, visando possibilitar as estimativas dos valores extremos dessa grandeza em sistemas reais.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A maior parte dos trabalhos aborda a obtenção o coeficiente de flutuação de pressão, apresentado na equação 1, sendo que poucos apresentam os valores de pressões ssociados à probabilidade de ocorrência.

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

sendo:

C_p = coeficiente de flutuação de pressão;

σ = desvio padrão;

g = aceleração da gravidade e;

V= velocidade média.

Toso (1986), Lopardo (1987) e Endres (1990), entre outros, estudaram a flutuação de pressão junto ao fundo de um ressalto hidráulico.

Para a determinação dos valores de pressão média (P_x) e desvio padrão (σ_x) podem ser utilizados as equações sugeridas por Marques et al. (1997).

Valores de pressão média apresentam uma distribuição longitudinal que pode ser ajustada na forma de um polinômio de segundo grau apresentada na equação 2.

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

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

onde:

$$\psi = \frac{(P_x - Y_1)}{(Y_2 - Y_1)}$$

$$\chi = \left[\frac{X}{(Y_2 - Y_1)}\right]$$

sendo:

P_x = pressão média na posição longitudinal X;

X = posição em relação ao início do ressalto hidráulico medido na linha central da bacia;

Y_1 = altura conjugada rápida do ressalto hidráulico e;

Y_2 = altura conjugada lenta do ressalto hidráulico.

O ajuste desse polinômio considerou os valores de Marques et al (1997) excluindo os resultados das tomadas a jusante da posição adimensional, $X/(Y_2-Y_1) = 9$, apresentando um coeficiente de correlação (R^2) igual a 0,98.

A figura 1 representa a distribuição longitudinal da pressão média ao longo do ressalto hidráulico com a curva de ajuste determinada.

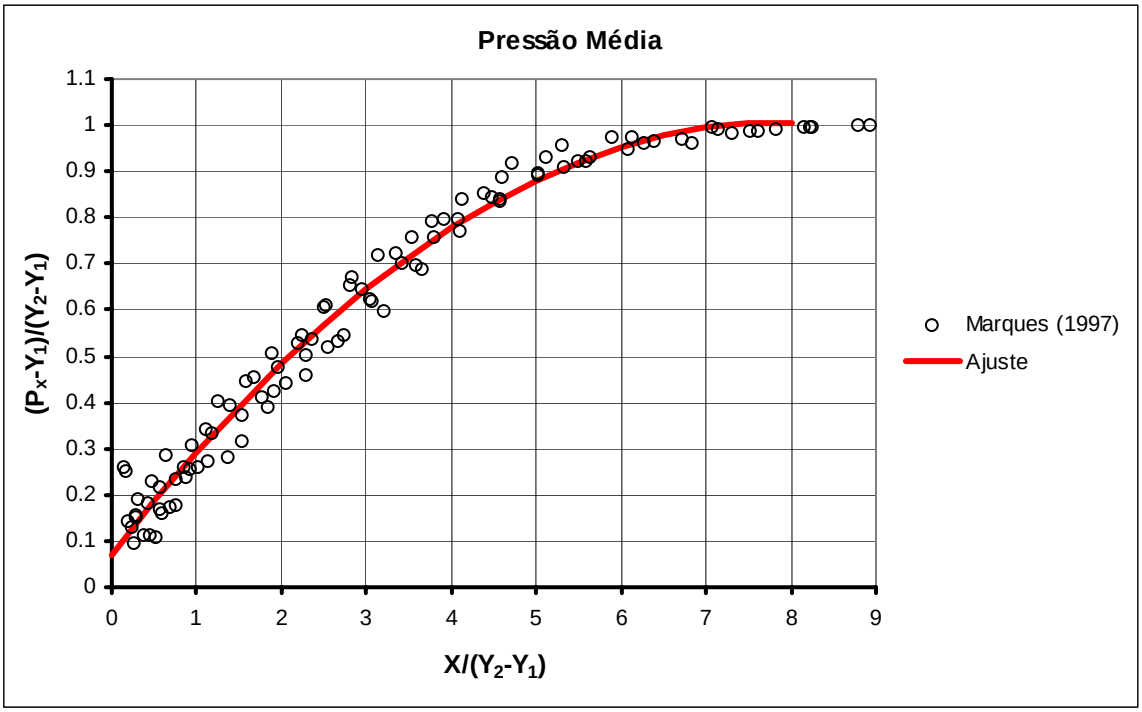


Figura 1 – Ajuste e visualização dos dados de Marques et al (1997) adimensionalizados em relação à distância ao início do ressalto e alturas conjugadas.

De uma forma análoga, o desvio padrão pode ser estimado seguindo metodologia proposta por Marques et al. (1997), que pode ter sua distribuição representada por dois polinômios de segundo grau. Dentre as alternativas de ajuste, esta foi a que apresentou um menor número de coeficientes aliado a melhores resultados.. As equações 3 e 4 representam os ajustes propostos e a figura 2 apresenta o conjunto de dados utilizados pelo autor.

$$\Omega = 0{,}19 + 0{,}573\chi - 0{,}159(\chi)^2 \qquad (3)$$

Obs: a equação é válida para o intervalo $0 \leq \chi < 2{,}4$.

$$\Omega = 1{,}229 - 0{,}281(\chi) + 0{,}017(\chi)^2 \qquad (4)$$

Obs: a equação é válida para o intervalo $2{,}4 \leq \chi \leq 8{,}25$.

onde:

$$\Omega = \left(\frac{\sigma_x}{H_t}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right)$$

$$\chi = \left[\frac{X}{(Y_2 - Y_1)}\right]$$

sendo:

σ_x = desvio padrão no ponto X e;

H_t = perda de energia na estrutura.

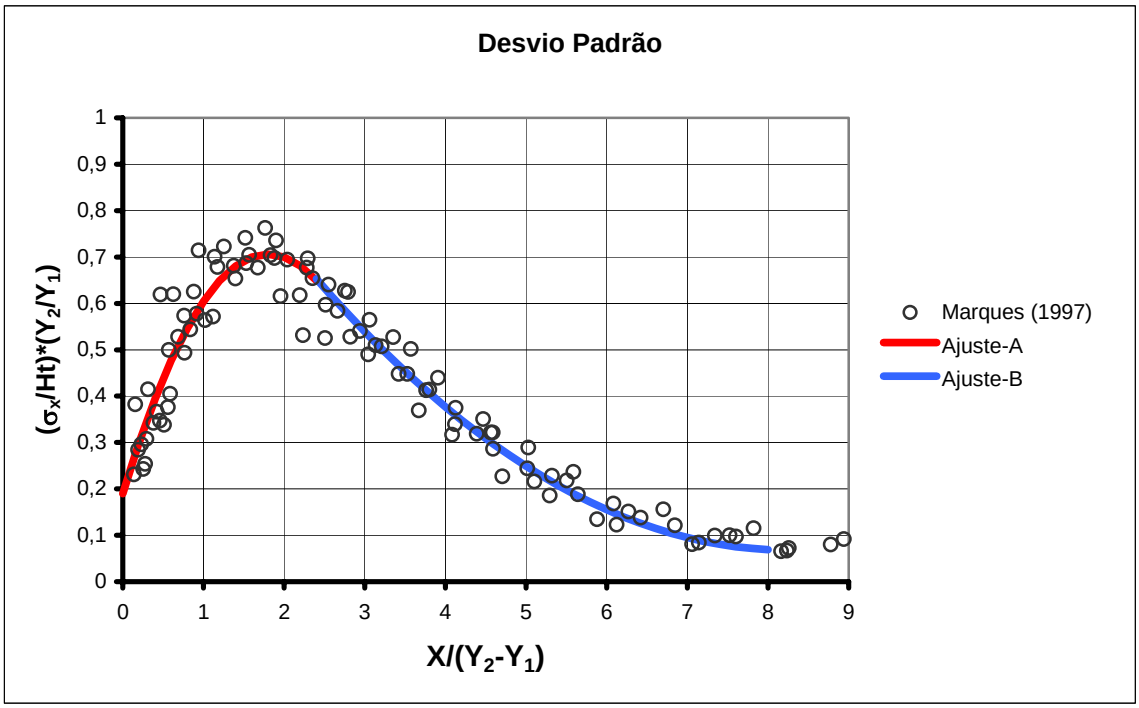


Figura 2 - Ajuste e visualização dos dados de Marques et al (1997) adimensionalizados em relação à distância ao início do ressalto, perda de energia e alturas conjugadas.

Conforme estudos de Lopardo (1987) e Marques (1997) o tipo de distribuição que descreve o comportamento das pressões junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico não é rigorosamente uma lei normal. Isso se atribui às distribuições dos coeficientes de assimetria (Ad) e curtose (k) verificados ao longo do ressalto, que diferem dos valores atribuídos a uma distribuição normal, sendo esses valores 0 e 3, respectivamente. No entanto, é possível observar que após o fim da influência do ressalto, posição adimensionalisada 8 conforme Teixeira (2003), tais valores são observados. Nas figuras 3 e 4 são apresentadas as distribuições dos coeficientes de assimetria e curtose.

Teixeira (2003), apresenta uma metodologia de previsão das pressões junto ao fundo com uma certa probabilidade de ocorrência, considerando as diversas distribuições existentes ao longo do ressalto hidráulico.

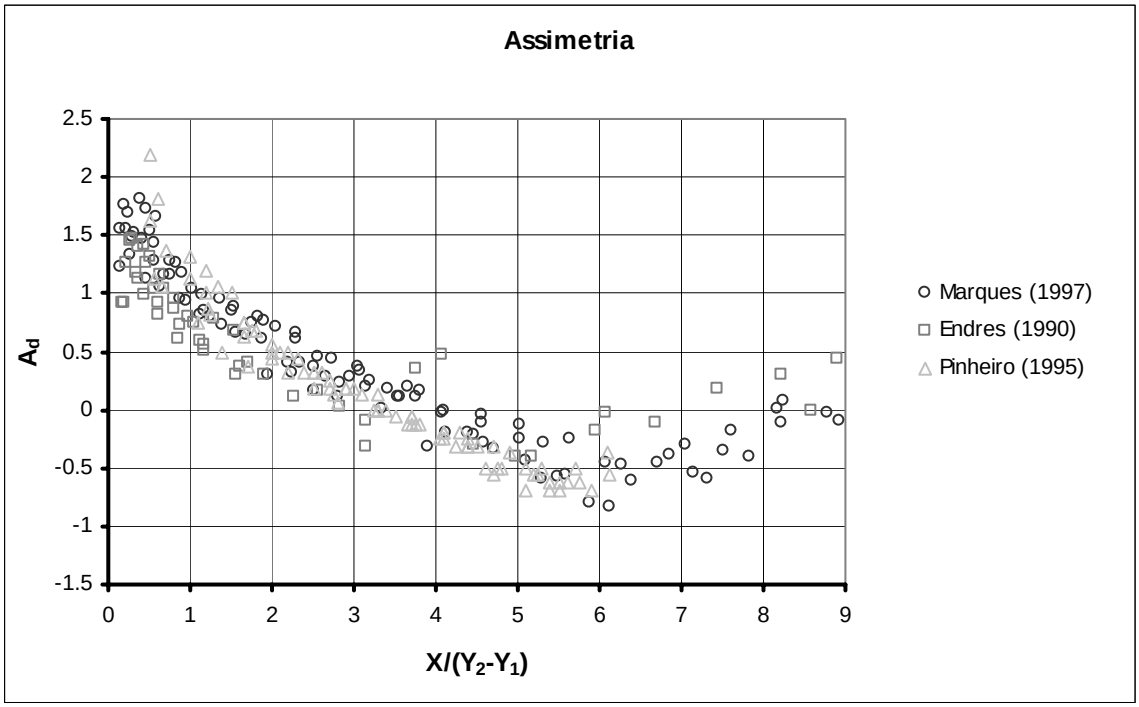


Figura 3 – Coeficiente de assimetria (Ad) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas.

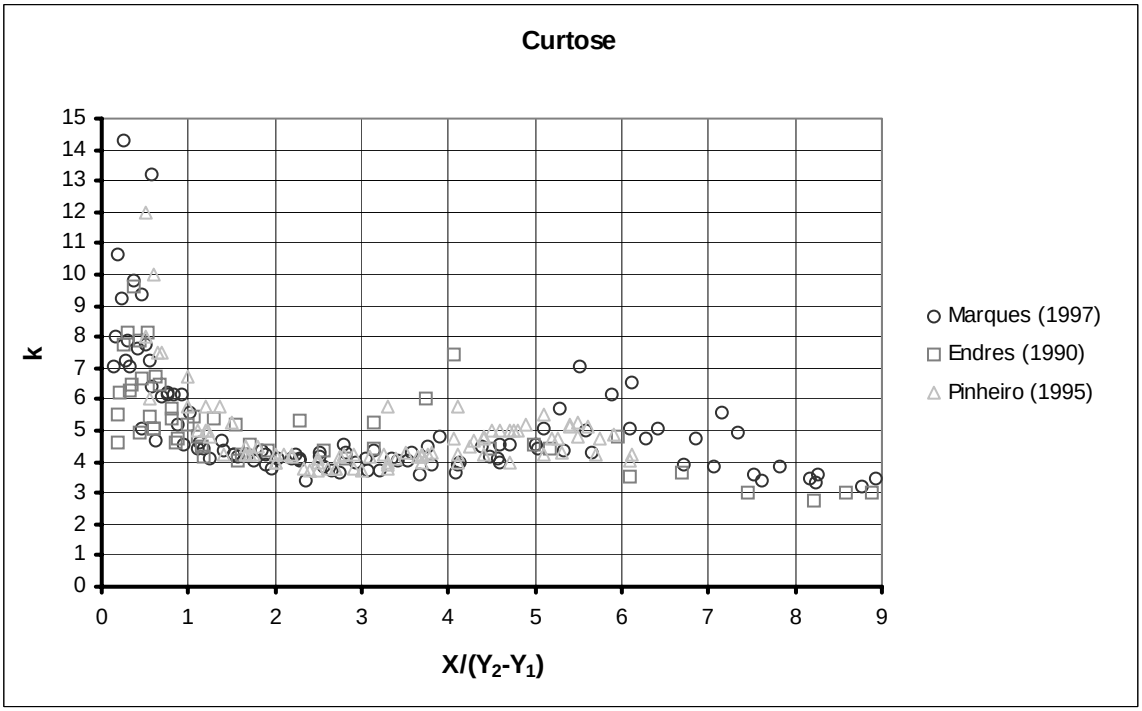


Figura 4 - Coeficiente de curtose (k) em função da posição relativa ao início do ressalto hidráulico e das alturas conjugadas.

METODOLOGIA

A existência de diferentes tipos de distribuições de probabilidade na zona de influência do ressalto hidráulico dificulta a previsão dos valores de pressão, entretanto, supõem-se que seja possível estimar estes valores, associados uma certa probabilidade de ocorrência, através da determinação de um coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N), calculado a partir das amostras obtidas em modelos reduzidos, juntamente com o conhecimento dos valores médios de pressão e desvio padrão adotados na equação estatística abaixo. Este coeficiente está relacionado a probabilidade da pressão ser inferior ou igual a um determinado valor de ocorrência.

$$P_{x\%} = P_x \pm N \times \sigma_x \qquad (5)$$

onde:

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

N = coeficiente estatístico para a uma determinada probabilidade;

P_x = pressão média no ponto X e;

σ_x = desvio padrão no ponto X.

Portanto, uma vez conhecidos a pressão média no ponto, o desvio padrão e o coeficiente estatístico, extraídos da curva de permanência acumulada dos dados, é possível estimar a pressão associados a uma certa probabilidade de ocorrência.

Análise dos dados

Para a determinação dos coeficientes (N) foram utilizados os dados obtidos por Endres (1990). Seria lógico utilizar os dados brutos de Marques (1995), já que estes foram utilizados para determinação das equações de ajuste da pressão média e do desvio padrão, porém não se dispunha da distribuição de freqüência para estes dados. Então, uma vez que os dados de Marques (1995) foram obtidos numa estrutura praticamente idêntica a de Endres (1990), foi possível utilizar estes dados para determinação do coeficiente. A figura 5 mostra os valores brutos obtidos por Endres para a tomada 5 e número de Froude (Fr) igual a 5,3.

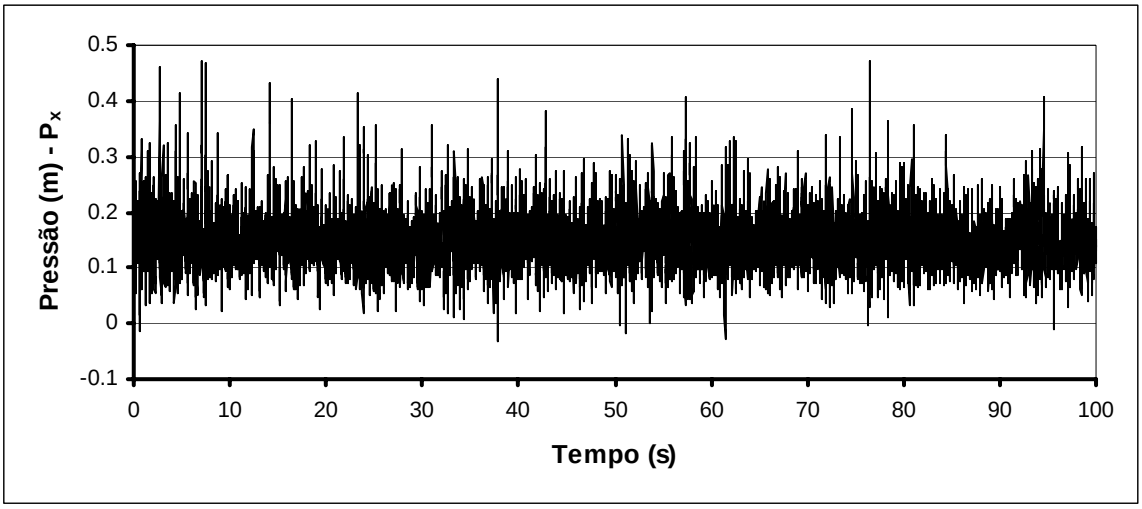


Figura 5 - Distribuição de pressões referentes à tomada 5, Fr = 5,3, Y_1 = 0,054 m, Y_2 = 0,379 m, $X/(Y_1-Y_2)$ = 0,98, P_x=0,152 e σ_x = 0,050404.

Através da distribuição dessas freqüências pode-se determinar curvas de permanência acumuladas para cada uma das tomadas de pressão para um mesmo número de Froude do escoamento como apresentada nas figuras 6, 7 e 8.

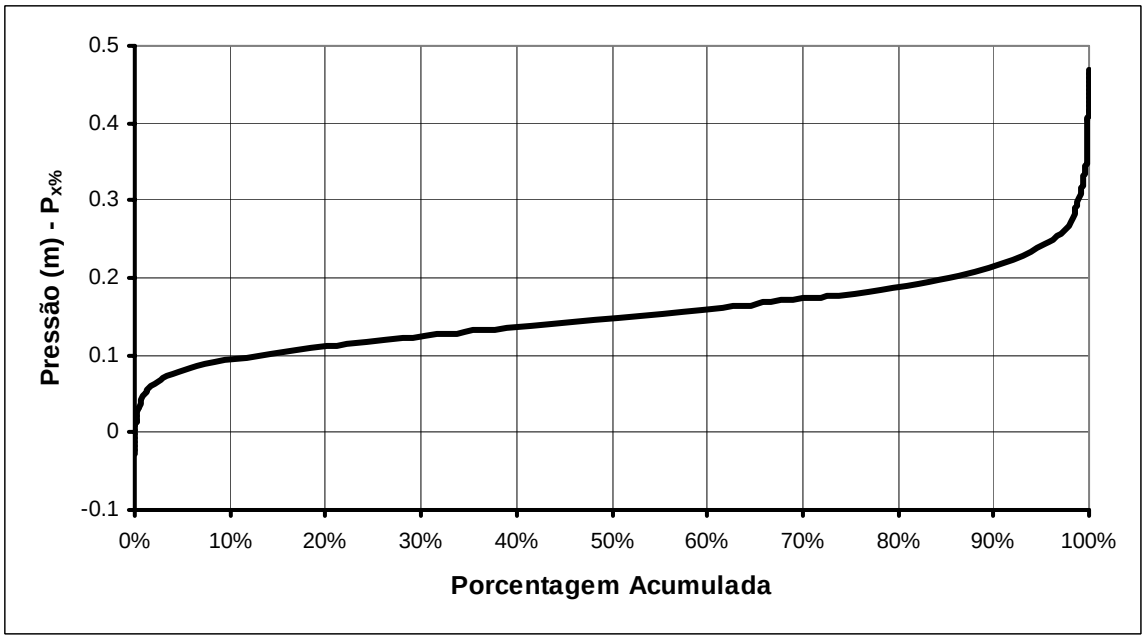


Figura 6 - Curva de permanência acumulada para a tomada 5, Fr = 5,3, Y_1 = 0,054 m, Y_2 = 0,379 m, $X/(Y_2-Y_1)$ = 0,98, P_x=0,152 e σ_x = 0,050404.

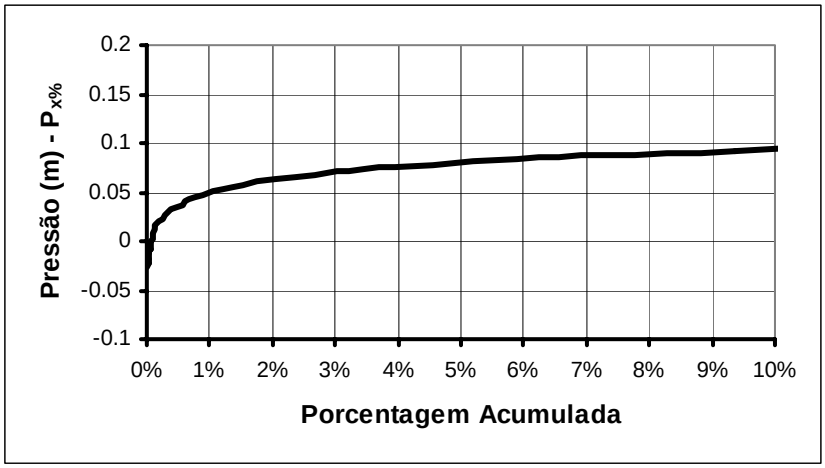


Figura 7 - Detalhe da Curva de Permanência acumulada para a tomada 5 com probabilidade entre 0% e 10%.

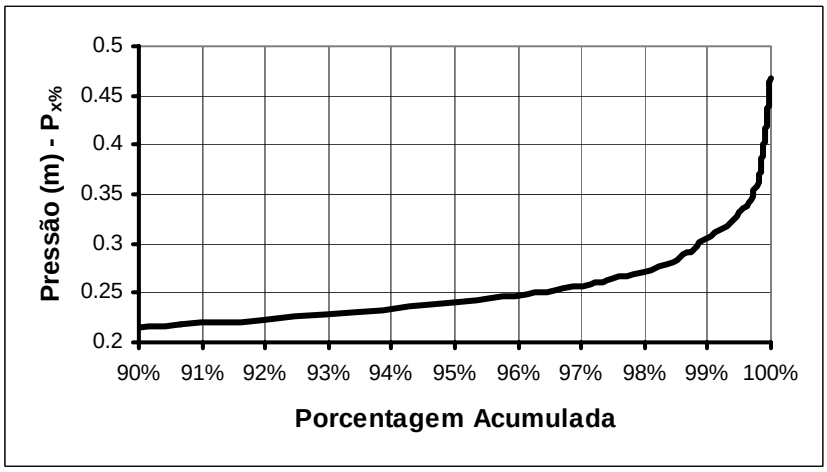


Figura 8 - Detalhe da Curva de Permanência acumulada para a tomada 5 com probabilidade entre 90% e 100%.

Através da curva de permanência foi possíveld eterminar os valores de pressão junto ao fundo para diferentes probabilidades, podendo-se calcular o valor do coeficiente (N) pela equação 6. A tabela 1 apresenta os valores do coeficiente estatístico para diferentes probabilidades de ocorrência.

$$N = \frac{(P_{x\%} - P_x)}{\sigma_x} \qquad (6)$$

Tabela 1 – Coeficiente estatístico (N) para diversas probabilidades de ocorrência referentes a tomada 5

Probabilidade ocorrência	Coeficiente estatístico (N)
1%	-2,0263
5%	-1,4320
10%	-1,1396
90%	1,2502
95%	1,7662
99%	3,0634

A figuras 9 a 14 contemplam os valores do coeficiente estatístico (N) para valores extremos de probabilidade de ocorrência em função da posição relativa adimensionalizado do início do ressalto

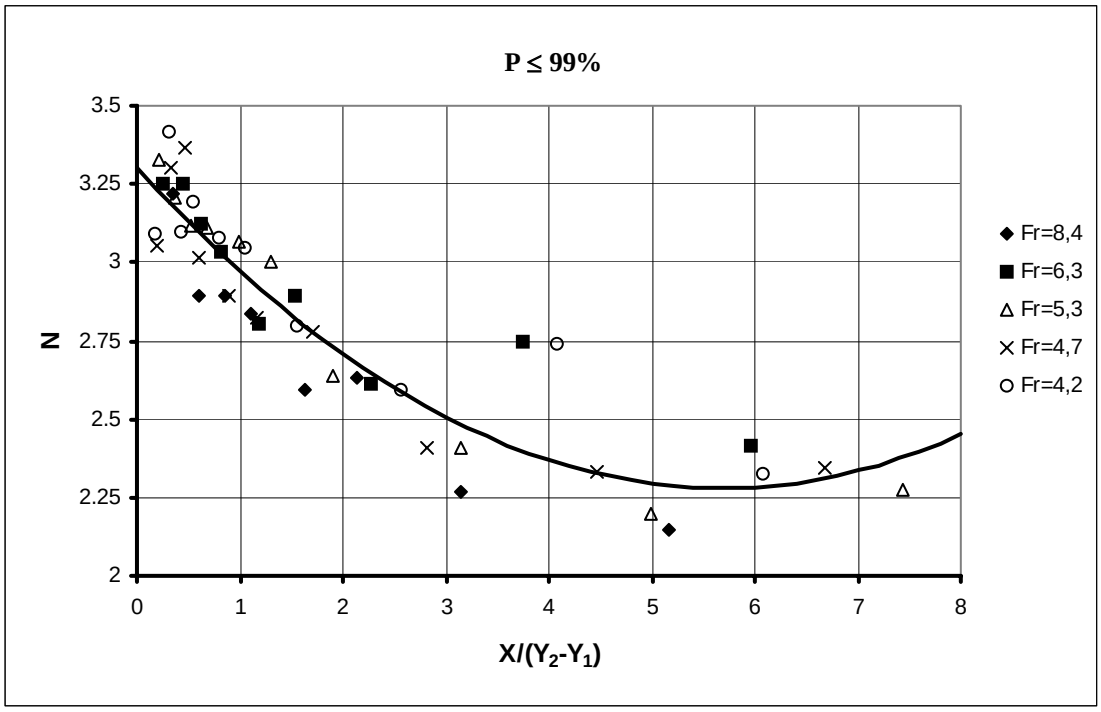


Figura 9 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 99% de ocorrência, obtido para os dados de Endres (1990) em função da posição relativa adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

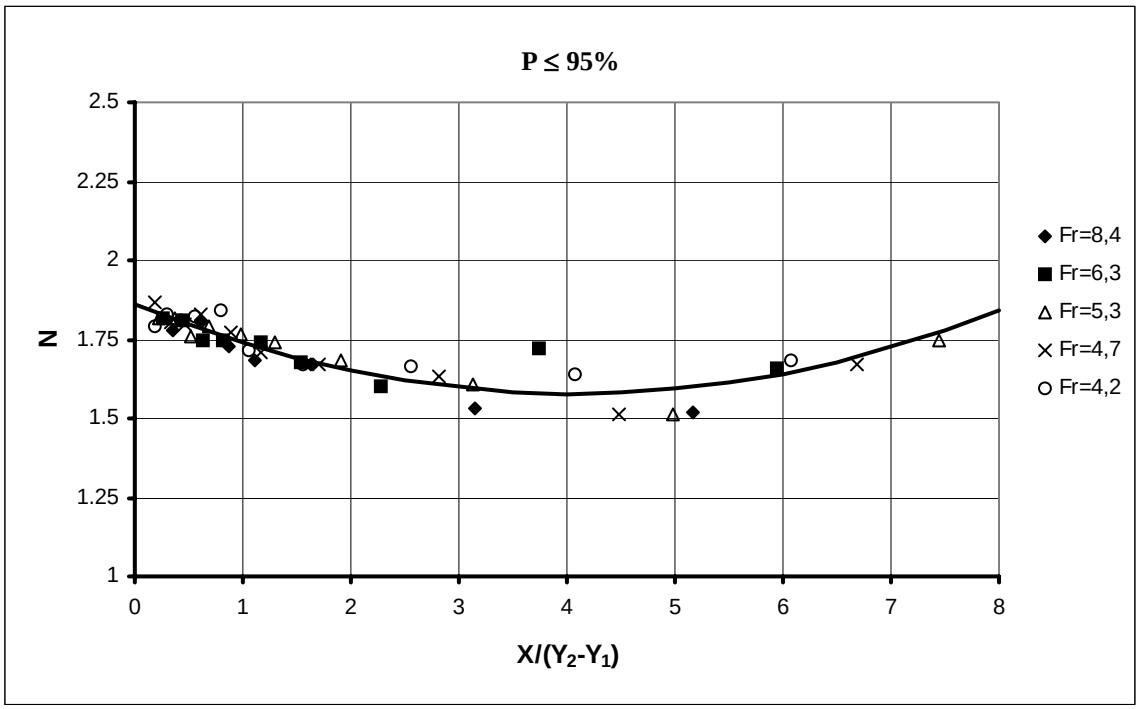


Figura 10 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 95% de ocorrência, obtido para os dados de Endres (1990) em função da posição relativa adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

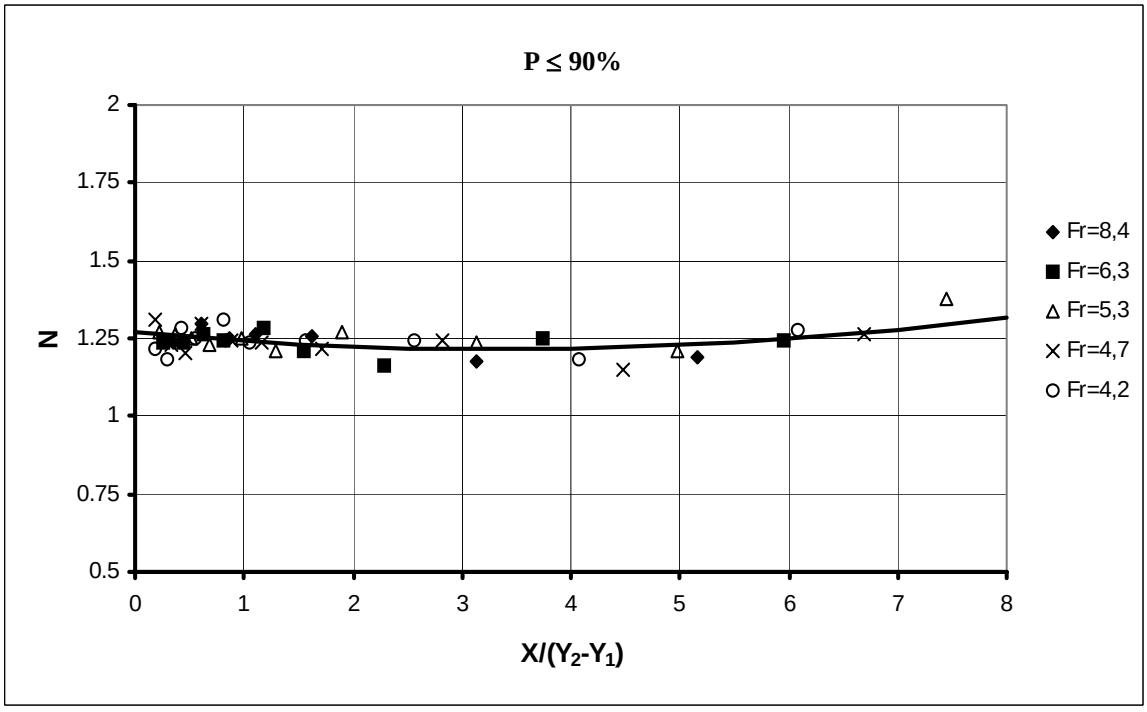


Figura 11 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 90% de ocorrência, obtido para os dados de Endres (1990) em função da posição relativa adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

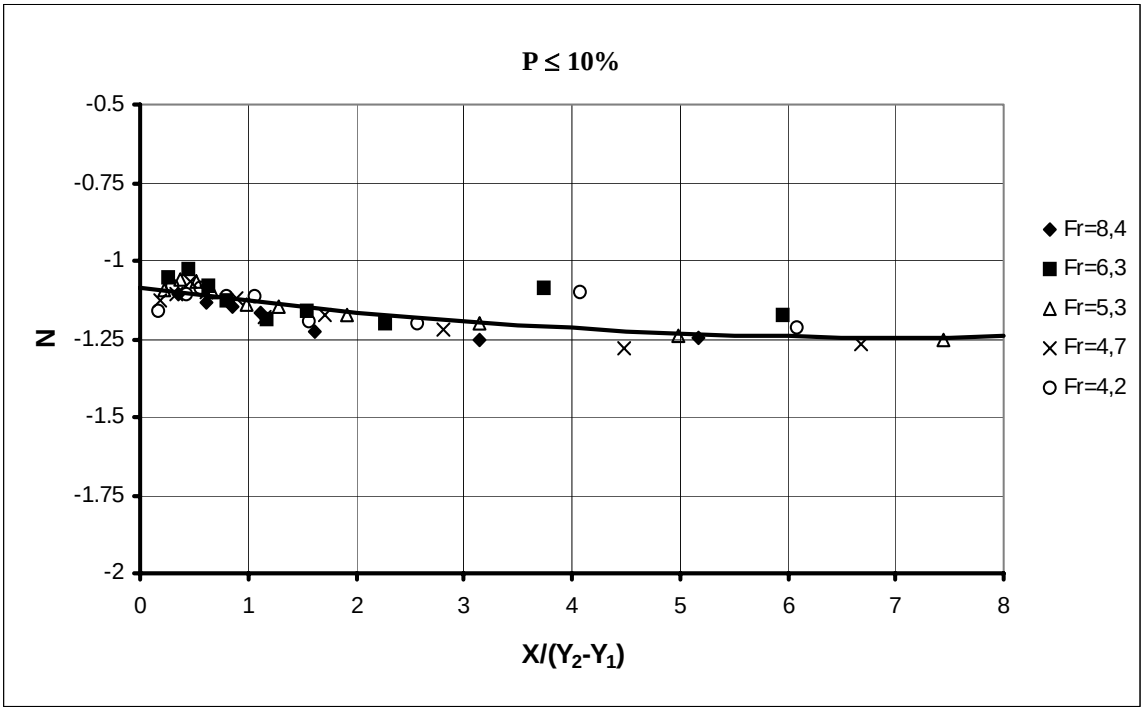


Figura 12 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 10% de ocorrência, obtido para os dados de Endres (1990) em função da posição relativa adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

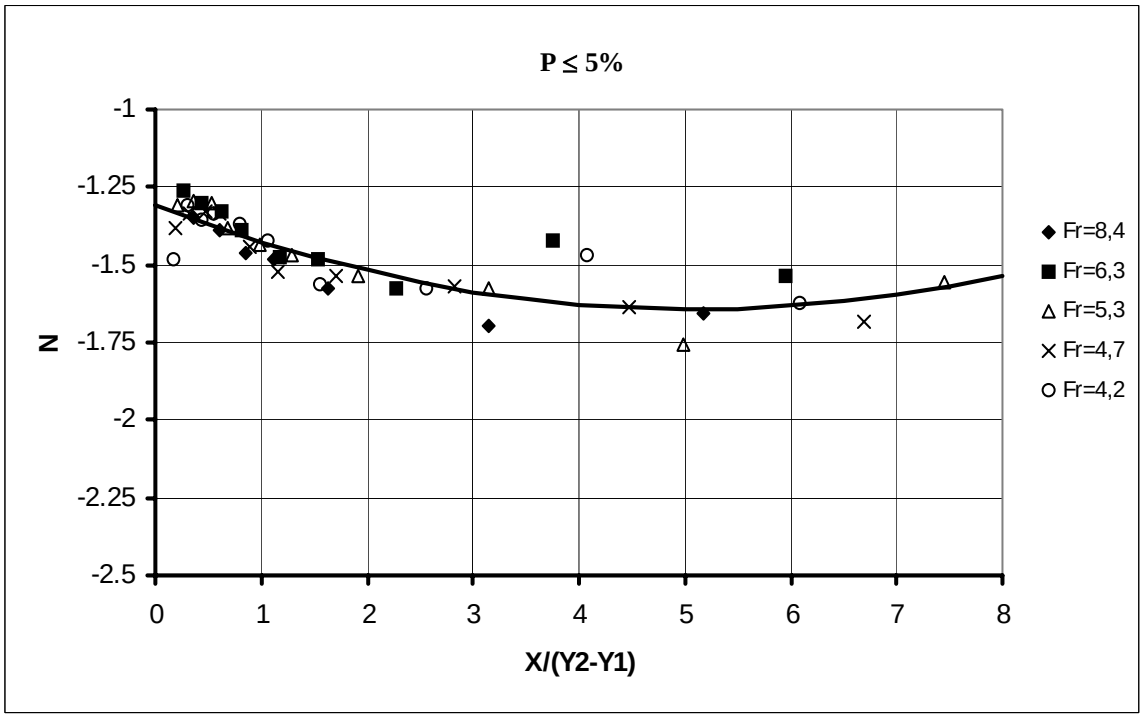


Figura 13 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 5% de ocorrência, obtido para os dados de Endres (1990) em função da posição relativa adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

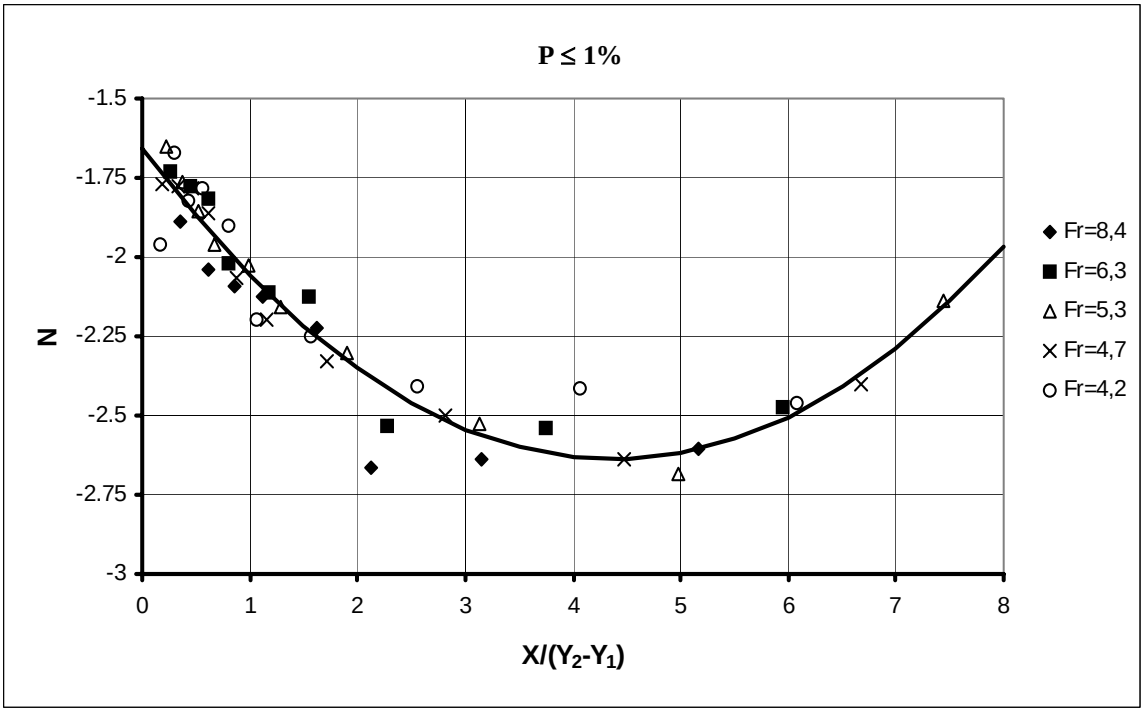


Figura 14 – Distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N) para a probabilidade de 1% de ocorrência, obtido para os dados de Endres (1990) em função da posição relativa adimensionalizada em relação ao início do ressalto hidráulico.

A partir da análise realizada sobre a distribuição longitudinal do coeficiente estatístico (N), representada pelas figuras 8 a14, nota-se estas que podem ser estimadas pelas tendências apresentadas. Além disso, a variação do coeficiente para as probabilidades extremas (1 e 99%) é maior que para as demais. Observa-se também que nas posições adimensionalisadas em torno de 8, os valores do coeficiente estatístico (N) tendem a se aproximar dos coeficientes estatísticos da distribuição de probabilidade de uma curva normal. Na tabela 2 são apresentados os valores do coeficiente estatístico para uma distribuição normal para as diferentes probabilidades:

Tabela 2 - Coeficiente estatístico para diversas probabilidades de ocorrência referentes a uma distribuição normal.

Probabilidade ocorrência	Coeficiente estatístico
1%	-2,33
5%	-1,65
10%	-1,29
90%	1,29
95%	1,65
99%	2,33

CONCLUSÕES

A determinação do coeficiente estatístico de distribuição de probabilidade (N) para valores extremos, apresentado neste trabalho, e para os valores médios, conforme Teixeira (2003), permite estimar as pressões médias e extremas que podem ocorrer em estruturas reais. A tendência dos valores do coeficiente estatístico (N) na posição em torno de 8 é se aproximar dos valores referentes a uma distribuição normal, o que pode ser atribuido ao fato do retorno do escoamento ao seu regime normal (fim da zona de influência do ressalto). Como continuação deste trabalho, estão sendo desenvolvidos estudos no Laboratório de Hidráulica do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS, utilizando dados de modelo e de protótipo, com o objetivo de confirmação e otimização do método proposto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ENDRES, L.A.M. (1990). **Contribuição ao Desenvolvimento de um Sistema para Aquisição e Tratamento de Dados de Pressões Instantâneas em Laboratório.** Dissertação (Mestrado) - Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. 104 p.

LOPARDO, R. A.; CHIVIDINI, M. F. and BERRILIO, D. A. (1987). **Effects of Hydraulic Jump Inflow Condition on the Decay of Turbulence in Stilling Basins**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NEW TECHNOLOGY IN MODEL TESTING IN HYDRAULIC RESEARCH. Índia, p. 111-114.

MARQUES, M. G. (1995). **Nouvelle Approche Pour le Dimensionnement des Dissipateurs à Auge**. Tese (Doutorado) - Québec, Canadá: Tese apresentada a Faculte des sciences et génie de la Université Laval, 221 p.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J. and VERRETTE, J. L. (1997). **Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico**. In.: XVII CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, Guayaquil – Equador 21-25 de Outubro.

PINHEIRO, A. A. N. (1995). **Acções 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.

TEIXEIRA, E. D. (2003). **Previsão de Valores Extremos de Pressões Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. Dissertação (Mestrado) - Porto Alegre: UFRGS, Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (a ser publicada em agosto de 2003).

TOSO, J. W (1986). **The Magnitude and Extent of Extreme Pressure Fluctuations in the Hydraulic Jump**. Ph.D. Thesis, Minnesota University, 163 p.