

Estimativa das Pressões Médias em uma Bacia de Dissipação por Ressalto Hidráulico em Declive usando Sobreposição de Esforços

Rodrigo Rodrigues Lopes¹, Matheus Kunrath Oliveira², Eder Daniel Teixeira³, Luiz Augusto Magalhães Endres⁴, Marcelo Giulian Marques⁵, Daniela Guzzon Sanagiotto⁶, Edgar Fernando Trierweiler Neto⁷, Mauricio Dai Prá⁸

Resumo: Um sistema extravasor de barragem é responsável por escoar, de forma segura e controlada, o excesso de água durante eventos hidrológicos, sendo comum o uso do ressalto hidráulico como mecanismo de dissipação de energia. Contudo, essas estruturas estão sujeitas a esforços hidrodinâmicos intensos e variáveis, o que pode comprometer sua integridade estrutural, tornando essencial a previsão das pressões atuantes. Neste contexto, o presente trabalho aplica uma metodologia de sobreposição de esforços para estimar as pressões médias em uma bacia de dissipação em declive submetida a diferentes graus de submergência do ressalto hidráulico. Para isso, foram utilizados dados experimentais obtidos em modelo físico reduzido do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, a partir de medições de pressão média por piezômetros, abrangendo quatro vazões e diferentes condições de escoamento, totalizando 16 cenários. A metodologia proposta baseia-se na sobreposição de efeitos, considerando que a pressão total resulta da soma das contribuições do escoamento livre (sem ocorrência do ressalto) e do ressalto hidráulico. Os resultados indicaram melhor desempenho da metodologia para menores vazões e para o grau de submergência igual a 1,2, com maior aderência entre valores medidos e estimados ao longo do vertedouro e da bacia de dissipação, exceto na região da soleira terminal, onde houve maiores diferenças.

Palavras-Chave: Pressão Média, Modelo físico, Ressalto Hídrico

Abstract: A dam spillway system is responsible for safely and controllably discharging excess water during hydrological events, and the use of the hydraulic jump as an energy dissipation mechanism is common. However, these structures are subjected to intense and variable hydrodynamic forces, which may compromise their structural integrity, making it essential to predict the acting pressures. In this context, the present study applies a load superposition methodology to estimate the mean pressures in a sloped stilling basin subjected to different degrees of hydraulic jump submergence. For this purpose, experimental data obtained from a reduced-scale physical model of the spillway system of the Foz do Chapecó Hydropower Plant were used, based on mean pressure measurements taken by piezometers, covering four flow rates and different flow conditions, totaling 16 scenarios. The proposed methodology is based on the superposition of effects, considering that the total pressure results from the sum of the contributions of free flow (without the occurrence of the hydraulic jump) and the hydraulic jump itself. The results indicated better performance of the methodology for lower flow rates and for a submergence degree equal to 1.2, with greater agreement between measured and estimated values along the spillway and stilling basin, compared to the terminal sill region.

Keywords: Mean Pressure, Physical Model, Hydraulic Jump

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - rodrigorlopes@ufrgs.br

²Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - matheuskunrath92@gmail.com

³Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - eder.teixeira@ufrgs.br

⁴Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - endres@ufrgs.br

⁵Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - mgiulianm@gmail.com

⁶Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - dsanagiotto@ufrgs.br

⁷Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - edtrier@gmail.com

⁸Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - mauricio.daipra@ufrgs.br

INTRODUÇÃO

Os vertedouros e dissipadores de energia hidráulica constituem os principais componentes do sistema extravasor de um barramento, sendo responsáveis pela condução e dissipação, de forma segura, dos volumes excedentes de água provenientes de eventos hidrológicos, sem comprometer a estabilidade estrutural do empreendimento. Dentre os mecanismos de dissipação, destaca-se a bacia de dissipação por ressalto hidráulico, amplamente empregada a jusante de vertedouros em função de sua elevada eficiência na redução da energia do escoamento. Apesar de sua relevância para a segurança hidráulica, essas estruturas podem estar sujeitas à ocorrência de manifestações patológicas, uma vez que, mesmo quando adequadamente dimensionadas, são submetidas a regimes de escoamento com elevadas velocidades e significativa carga energética, resultando em esforços hidrodinâmicos intensos e altamente variáveis. Nesse contexto, a adequada previsão das pressões atuantes torna-se um aspecto fundamental para o dimensionamento seguro e economicamente viável dessas estruturas.

O ressalto hidráulico caracteriza-se como um fenômeno decorrente da transição abrupta do escoamento em regime supercrítico para subcrítico, promovendo elevação significativa da lâmina d'água, intensa turbulência e elevada incorporação de ar ao escoamento. Embora seja amplamente utilizado como mecanismo dissipador de energia, o fenômeno pode ocasionar efeitos indesejáveis à estrutura, tais como flutuações de pressão, subpressões, cavitação e fadiga do material, especialmente na laje de concreto das bacias de dissipação. Ademais, o comportamento do ressalto hidráulico é fortemente influenciado pelas condições de jusante, particularmente pela profundidade do escoamento, associada ao grau de submergência, o que introduz incertezas quanto à sua posição de ocorrência.

A análise dos esforços hidrodinâmicos nesses sistemas é frequentemente realizada a partir do estudo das pressões ao longo das superfícies das estruturas. Nesse contexto, a pressão média destaca-se como um parâmetro de grande relevância para o dimensionamento estrutural, por representar o comportamento global das cargas atuantes. Entretanto, a distribuição dessas pressões ao longo do ressalto hidráulico não segue um regime hidrostático, sendo influenciada por fatores como o número de Froude, as alturas conjugadas, a geometria da bacia de dissipação e as condições de submergência.

Diversos estudos experimentais têm sido desenvolvidos com o objetivo de investigar o regime de pressões associado ao ressalto hidráulico, destacando-se o uso de modelos físicos reduzidos como ferramenta de análise. Trabalhos realizados por Endres (1990), Marques et al. (1997), Teixeira (2008) e Dai Prá (2011) contribuíram significativamente para a compreensão da distribuição de pressões médias, propondo abordagens baseadas em relações adimensionais e na sobreposição de efeitos entre o escoamento livre e o ressalto hidráulico. Contudo, observa-se que a maior parte dessas investigações se concentra em bacias de dissipação com fundo horizontal, sendo ainda reduzido o número de estudos voltados à análise do regime de pressões em bacias com fundo inclinado.

Nesse contexto, o presente trabalho, fundamentalmente apoiado em Oliveira (2023), tem como objetivo aplicar uma metodologia de sobreposição de esforços para estimar as pressões médias em uma bacia de dissipação em declive submetida a diferentes graus de submergência do ressalto hidráulico.

MÉTODOS

Para a aplicação da metodologia de sobreposição de esforços hidráulicos, tomou-se, por base, as características geométricas do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, considerando a formação do ressalto hidráulico sob diferentes condições de submergência. Foram, então, utilizados dados

experimentais obtidos a partir de ensaios realizados em modelo físico reduzido, disponibilizados pela extinta Eletrobras-FURNAS, oriundos do projeto de pesquisa e desenvolvimento intitulado “Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas”, desenvolvido em parceria com Foz do Chapecó Energia S.A., Eletrobras-Furnas e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Eletrobras-Furnas, 2022).

Os ensaios foram conduzidos em um modelo físico reduzido bidimensional do sistema extravasor, construído na escala 1:40 e instalado no extinto Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE). O modelo é composto por um vertedouro controlado por comportas e uma bacia de dissipação inclinada, projetada para a formação de ressalto hidráulico. A semelhança hidráulica entre modelo e protótipo foi garantida pelo critério de semelhança de Froude, adequado para a representação de escoamentos à superfície livre, nos quais predominam as forças inerciais e gravitacionais.

Durante os ensaios, foram investigadas diferentes condições hidráulicas a partir da variação da vazão e do nível de água a jusante, possibilitando a análise de situações de escoamento com e sem formação de ressalto hidráulico com diferentes graus de submergência. Ao todo, foram consideradas dezesseis condições experimentais, nas quais foram 4 vazões distintas, conforme Tabela 1, a partir das quais foram medidas as pressões médias ao longo da estrutura. A coleta de dados foi realizada por meio de medidores de vazão e tubos piezométricos, estes distribuídos ao longo de seções previamente definidas no modelo, permitindo a análise da sua variação ao longo do escoamento, desde a região do vertedouro até a bacia de dissipação. A Figura 1 ilustra, esquematicamente, as instalações experimentais utilizadas.

Tabela 1. Condições de ensaio (modelo na escala 1:40).

Q Protótipo (m³/s)	Q Modelo (L/s)	NA RES (m)*	NA JUS (m)*	Submergência
5519	72,70	264,43	-	-
		264,74	227,29	1,0
		264,95	229,34	1,2
		264,78	231,40	1,4
9732	128,20	264,31	-	-
		264,99	229,18	1,0
		264,96	231,65	1,2
		264,86	233,92	1,4
17291	227,80	264,87	-	-
		264,77	231,93	1,0
		264,75	234,74	1,2
		264,83	237,52	1,4
29876	393,70	264,47	-	-
		264,55	235,59	1,0
		264,63	238,92	1,2
		264,63	242,25	1,4

* Níveis de água referenciadas ao protótipo

A metodologia de análise adotada baseou-se na identificação dos principais mecanismos hidráulicos atuantes e na busca por relações que permitissem o agrupamento dos dados experimentais. Para isso, o sistema extravasor foi dividido em trechos com comportamentos semelhantes, possibilitando o ajuste de equacionamentos para cada região. Além disso, foram empregadas relações adimensionais, com o objetivo de uniformizar a apresentação dos resultados.

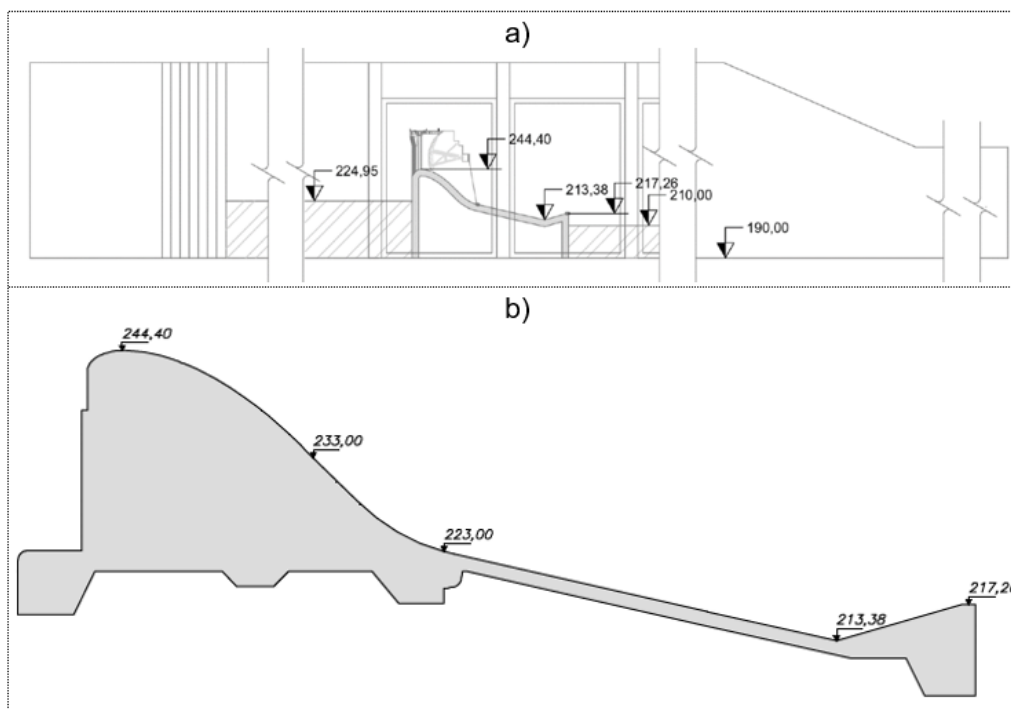


Figura 1 – Esquematização, em perfil longitudinal e escala de protótipo, das estruturas estudadas, inseridas no canal de alimentação (a) e em maior detalhamento do sistema extravasor (b).

A aplicação da metodologia de sobreposição na análise das pressões médias pressupõe que os valores observados ao longo da estrutura podem ser interpretados como a soma de duas parcelas distintas: uma associada ao escoamento sem a formação do ressalto hidráulico e outra decorrente da formação do ressalto hidráulico. Com base nessa interpretação, a pressão média total foi decomposta nessas duas contribuições, permitindo a análise isolada de cada fenômeno.

A parcela referente ao escoamento sem ressalto foi obtida diretamente a partir dos ensaios realizados nessa condição, sendo posteriormente tratada por meio da divisão do sistema em trechos e do uso de relações adimensionais que consideram a influência da vazão e da geometria da estrutura. Essa etapa foi fundamental para estabelecer uma base de comparação para as demais condições analisadas.

Por sua vez, a parcela de pressão associada ao ressalto hidráulico foi determinada de forma indireta, pela diferença entre a pressão total medida nas condições com ressalto e a pressão correspondente ao escoamento livre. A partir dessa abordagem, foi possível isolar o efeito do ressalto e investigar sua influência sobre a distribuição de pressões ao longo da bacia de dissipação, conforme Equação 1.

$$\frac{P_{\text{méd}}(RH)}{h_1} = f\left(\frac{X - X_1}{h_1}\right) \quad (1)$$

Onde: $P_{\text{méd}}(RH)$ é a pressão média devida ao ressalto hidráulico (m.c.a.); X é a posição de análise (m); X_1 é a posição de início do ressalto hidráulico (m); h_1 é a altura conjugada rápida do ressalto (m); NA_{jus} é o nível de água a jusante do sistema extravasor (m); NA_{mon} é o nível de água a montante do sistema extravasor, ou no reservatório (m).

Outro aspecto importante da metodologia consistiu na determinação da posição de início do ressalto hidráulico, definida como o ponto ao longo da estrutura a partir do qual as pressões médias passam a diferir significativamente daquelas observadas em escoamento sem ressalto. Essa definição permitiu

identificar a região de atuação do fenômeno e foi utilizada como parâmetro essencial nas relações adimensionais propostas, a partir de uma relação adimensional apresentada na Equação 2.

$$\frac{X_1}{h_c} = f\left(\frac{NA_{jus}}{NA_{mon}}\right) \quad (2)$$

Onde: h_c é a altura crítica do escoamento (m); NA_{jus} é o nível de água a jusante do sistema extravasor (m); NA_{mon} é o nível de água a montante do sistema extravasor, ou no reservatório (m).

Com base nessas considerações, foram estabelecidas relações que expressam a parcela de pressão média associada ao ressalto em função da posição ao longo da estrutura e de parâmetros característicos do escoamento, como a altura conjugada rápida e a altura crítica.

Dessa forma, a metodologia adotada permitiu não apenas a interpretação dos dados experimentais, mas também a proposição de equacionamentos capazes de representar o comportamento hidráulico do sistema extravasor, com ênfase na influência do ressalto hidráulico sobre as pressões médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise das pressões médias ao longo do sistema extravasor mostrou que seu comportamento é influenciado pela vazão, pela geometria da estrutura, pelo nível de água a jusante e pela formação do ressalto hidráulico. A Figura 2 ilustra os resultados obtidos experimentalmente em termos de cota piezométrica referenciada a valores de protótipo.

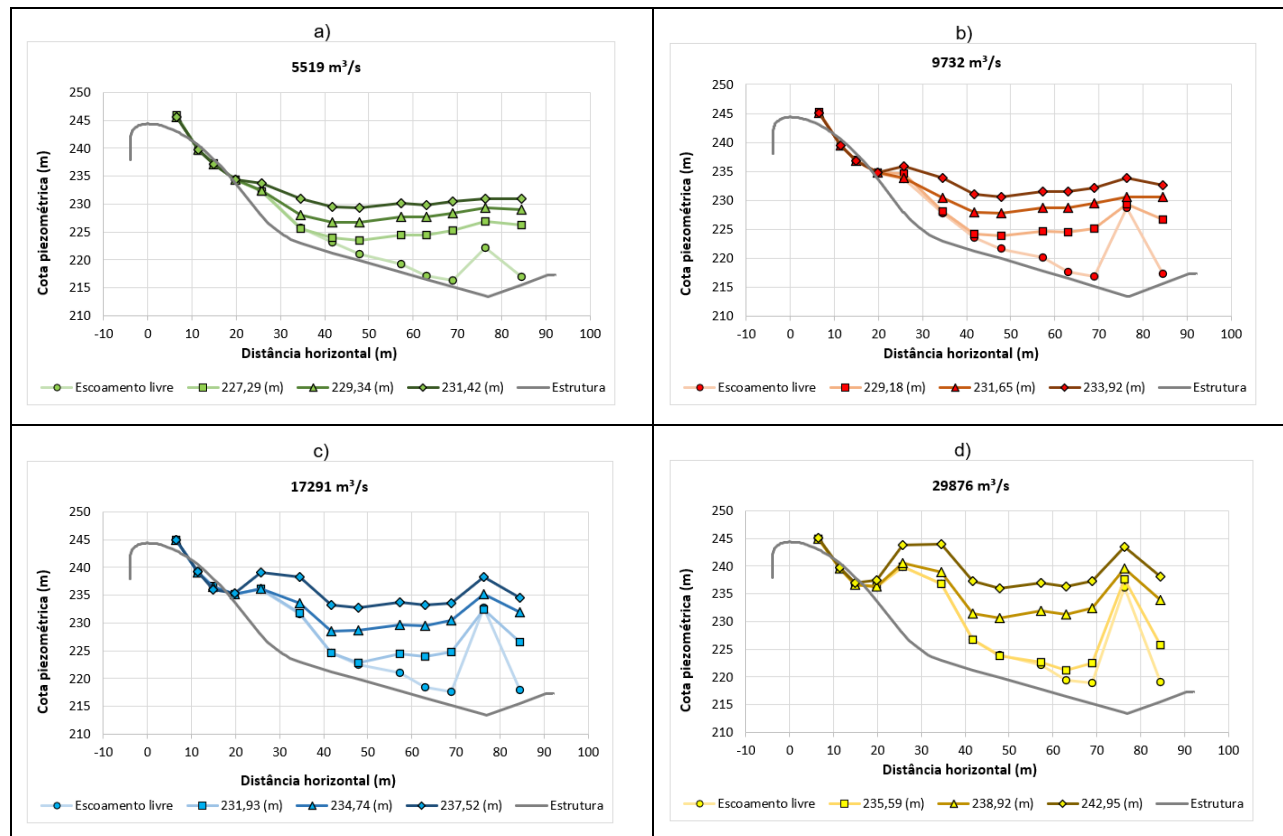


Figura 2 - Pressões médias, na forma de cota piezométrica, medidas durante os ensaios realizados com as vazões: a) 5519 m³/s, b) 9732 m³/s, c) 17291 m³/s e d) 29876 m³/s.

A comparação entre as condições de escoamento sem e com formação de ressalto permitiu identificar a posição aproximada de início do ressalto hidráulico, parâmetro fundamental para a interpretação dos resultados.

A parcela de pressão média associada ao ressalto hidráulico foi obtida pela diferença entre a pressão média total medida e a parcela referente ao escoamento sem formação de ressalto. A partir dessa abordagem, o sistema extravasor foi dividido em dois trechos.

No primeiro, que se estende do início do ressalto até a tomada T13, os dados apresentaram bom agrupamento após a adimensionalização, resultando em ajuste com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,97. Esse resultado indica que a metodologia representou de forma satisfatória o comportamento da pressão média na maior parte da estrutura.

No segundo trecho, correspondente à região final do sistema extravasor, verificou-se maior dispersão dos dados e menor qualidade de ajuste, com R^2 igual a 0,78. Esse comportamento sugere maior complexidade hidráulica nessa região, possivelmente em razão da influência da soleira terminal e da mudança das condições locais de escoamento. Ainda assim, a metodologia foi capaz de reproduzir a tendência geral observada experimentalmente.

A Figura 3 ilustra os resultados obtidos, acompanhados das curvas de ajuste para cada um dos dois trechos de análise.

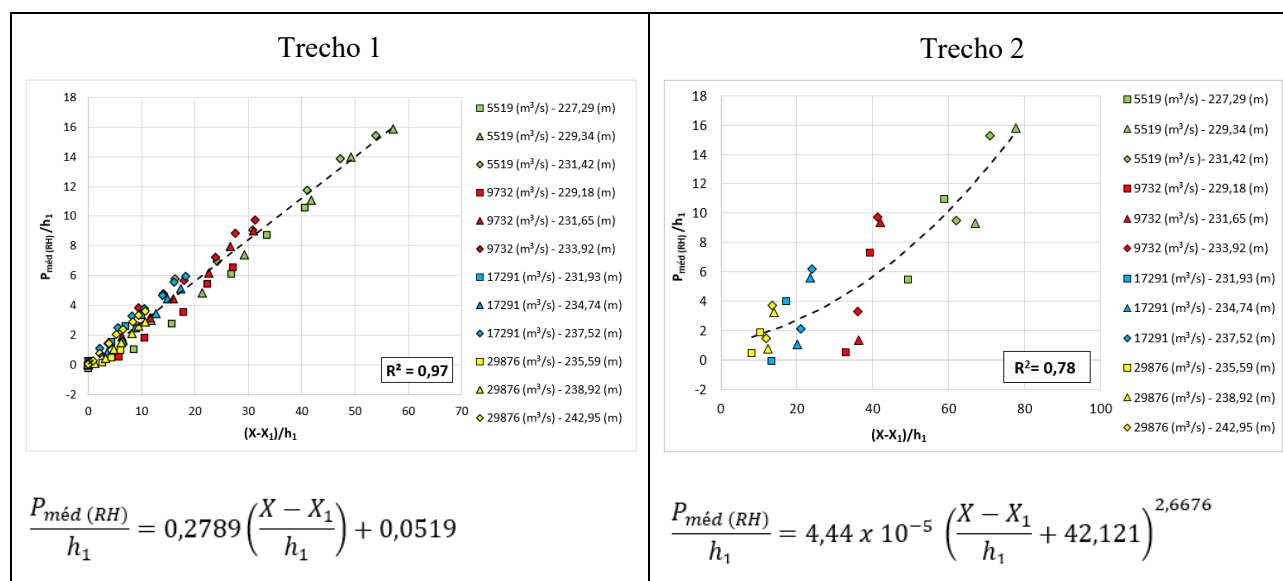


Figura 3 - Ajuste realizado para os trechos 1 e 2 da análise de pressão média.

Foi proposta, também, uma equação para estimar a posição de início do ressalto hidráulico, relacionando esse parâmetro com a altura crítica do escoamento e com a razão entre os níveis de água a jusante e montante, conforme ilustrado na Figura 4. O ajuste obtido apresentou R^2 igual a 0,95, demonstrando boa aderência aos dados experimentais e reforçando a importância desse parâmetro para a estimativa da parcela de pressão associada ao ressalto.

De modo geral, os resultados indicam que a metodologia proposta foi mais eficiente na região compreendida entre o vertedouro e a bacia de dissipação, onde o comportamento dos dados foi mais regular. Na região final da estrutura, na região da soleira terminal, os resultados apresentaram maior dispersão, mas ainda permitiram identificar a tendência de distribuição das pressões médias. Assim, a separação entre a parcela de escoamento livre e a parcela associada ao ressalto hidráulico mostrou-se adequada para representar o comportamento hidráulico do sistema extravasor estudado.

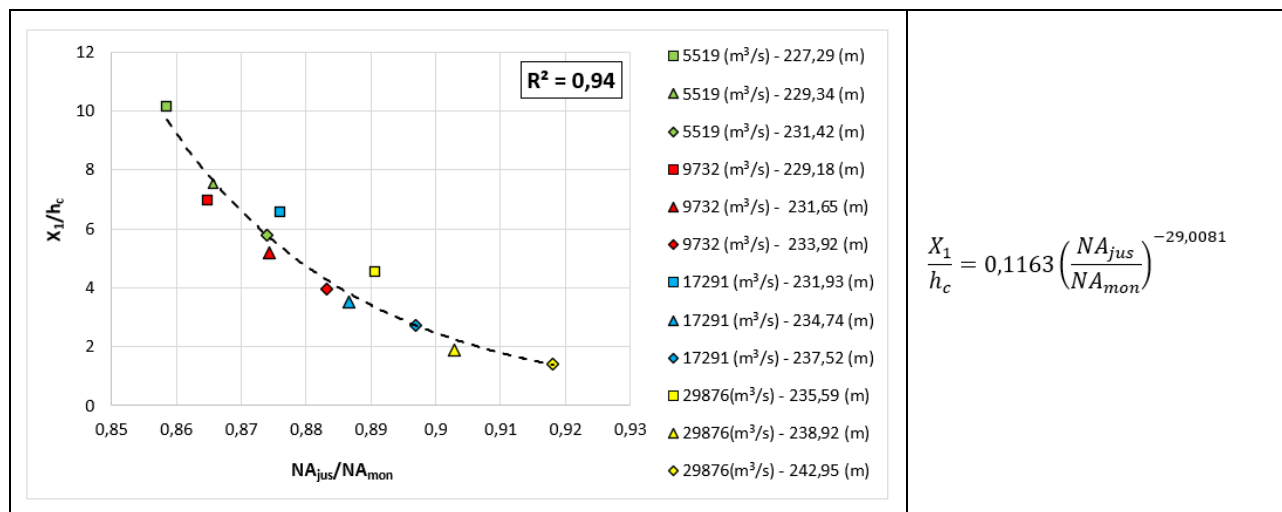


Figura 4 - Ajuste realizado para a determinação, aproximada, da posição de início do ressalto hidráulico.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar uma metodologia de sobreposição de esforços, aplicada ao sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, com ênfase na influência do ressalto hidráulico sob diferentes graus de submersão. A partir do uso de dados experimentais obtidos em modelo físico reduzido, foi possível interpretar a distribuição das pressões médias ao longo da estrutura e identificar a influência conjunta da vazão, da geometria do extravasor e das condições de jusante sobre o escoamento.

Os resultados mostraram que a decomposição da pressão média total em duas parcelas, uma associada ao escoamento livre e outra decorrente do ressalto hidráulico, foi adequada para representar o comportamento hidráulico do sistema estudado. Essa abordagem permitiu isolar o efeito do ressalto e propor relações capazes de descrever sua contribuição para a distribuição das pressões médias ao longo da bacia de dissipação. Além disso, a determinação aproximada da posição de início do ressalto mostrou-se um parâmetro fundamental para a organização dos dados e para a aplicação da metodologia.

De forma geral, a metodologia apresentou melhor desempenho na região compreendida entre o vertedouro e a bacia de dissipação, onde os dados mostraram comportamento mais regular e melhor aderência aos ajustes realizados. No trecho final da estrutura, correspondente à região da soleira terminal, observou-se maior dispersão dos dados, indicando maior complexidade hidráulica e, consequentemente, menor precisão dos ajustes. Ainda assim, os resultados obtidos permitiram representar satisfatoriamente a tendência geral de variação das pressões médias ao longo do sistema extravasor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Foz do Chapecó Energia S.A. pela disponibilização dos dados experimentais utilizados neste estudo. Agradecem também à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) e ao Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), pelo suporte acadêmico e científico ao desenvolvimento do trabalho. Registra-se, ainda, o agradecimento ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica (PROBIC), com apoio da FAPERGS-UFRGS, pelo incentivo à pesquisa. Por fim, os autores agradecem ao extinto Laboratório

de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE), onde foram realizados os ensaios em modelo físico reduzido que subsidiaram esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

DAI PRÁ, M. **Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2011.

ELETROBRAS FURNAS. **Relatório técnico DSB.E.173.2022-R0 - P&D Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas – Ensaio em modelo reduzido parcial do vertedouro da UHE Foz do Chapecó**. Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia - Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica. Rio de Janeiro, 2022.

ENDRES, L. A. M. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 1990.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J.-L. **Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 2, p. 45–52, 1997.

OLIVEIRA, M. K. **Análise das Pressões Médias ao Longo do Sistema Extravasador da UHE Foz do Chapecó**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Hídrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2023.

TEIXEIRA, E. D. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2003.