

Análise das Pressões Médias de um Escoamento em Regime Rápido sobre um Sistema Extravador de Cheias

Leonardo Zanetti Wieczorek¹, Matheus Kunrath Oliveira², Eder Daniel Teixeira³, Luiz Augusto Magalhães Endres⁴, Marcelo Giulian Marques⁵, Daniela Guzzon Sanagiotto⁶, Edgar Fernando Trierweiler Neto⁷, Mauricio Dai Prá⁸

Resumo: O sistema extravasor de um barramento é um componente crítico de segurança, destinado a escoar vazões de cheia e dissipar a elevada energia cinética do escoamento. Devido aos intensos esforços hidrodinâmicos que podem causar danos estruturais, a previsão das pressões atuantes no sistema é fundamental para o projeto. O presente trabalho apresenta uma parcela da metodologia desenvolvida para a estimativa das pressões médias em sistemas extravasores com bacia de dissipação inclinada. O estudo baseia-se em dados experimentais coletados por meio de piezômetros e de pontas linimétricas em um modelo físico bidimensional (escala 1:40) do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó. O trabalho foca na caracterização detalhada da parcela de pressão proveniente do escoamento livre, ou seja, sem a formação do ressalto hidráulico, entendida como a linha de base fundamental para a metodologia de sobreposição de efeitos. Foram ensaiadas quatro vazões distintas sob condição de escoamento livre permitindo correlacionar a profundidade da lâmina d'água com as pressões de fundo. Os resultados demonstraram que a estimativa das pressões no escoamento livre apresenta boa aderência aos dados medidos, especialmente ao longo do vertedouro e da bacia de dissipação em declive. As pressões médias nos trechos da superfície hidráulica que apresentavam curvas de concordância vertical foram objeto da incorporação de correção a partir da proposição de raios de curvatura virtuais, visando adequar os aspectos práticos aos teóricos.

Palavras-Chave: Modelagem Física, Escoamento Livre, Pressões Médias

Abstract: The spillway system of a dam is a critical safety component designed to discharge flood flows and dissipate the flow's high kinetic energy. Due to the intense hydrodynamic forces that can cause structural damage, predicting the pressures acting on this system is fundamental for its design. The present work presents a part of the methodology developed to estimate mean pressures in spillway systems with an inclined stilling basin. The study is based on experimental data collected using piezometers and point gauges in a two-dimensional physical model (1:40 scale) of the Foz do Chapecó HPP spillway. The research focuses on the detailed characterization of the pressure component resulting from free flow, understood as the fundamental baseline for the superposition of effects methodology. Four distinct flow rates were tested under free flow conditions—that is, without the formation of a hydraulic jump—allowing for the correlation of water depth with bottom pressures. The results demonstrated that the estimation of free flow pressures shows good agreement with the measured data, especially along the spillway and the inclined stilling basin. The mean pressures in

¹Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - lzanettiw@gmail.com

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

the sections of the hydraulic surface featuring vertical curves were subjected to a correction by proposing virtual radii of curvature, aiming to align practical aspects with theoretical principles.

Keywords: Physical Modeling, Free Flow, Mean Pressures

INTRODUÇÃO

Os vertedouros e as estruturas de dissipação de energia hidráulica constituem os principais componentes do sistema extravasor de um barramento, tendo a finalidade de escoar volumes excedentes de água de forma segura durante eventos de cheia. Devido à elevada carga hidráulica associada a essas descargas, tais estruturas ficam submetidas a esforços hidrodinâmicos extremamente intensos e variáveis. A previsão precisa desses esforços é um desafio fundamental na engenharia hidráulica, pois, mesmo em projetos bem dimensionados, podem ocorrer anomalias estruturais, como avarias superficiais geradas por fadiga e cavitação.

Historicamente, grande parte da literatura técnica e das pesquisas em modelos físicos têm focado nos efeitos advindos das estruturas turbulentas de grande escala do ressalto hidráulico formado em bacias de dissipação estritamente horizontais (Endres, 1990; Marques et al., 1997; Teixeira, 2008 e Dai Prá, 2011). Entretanto, o número de trabalhos que investiga o regime de pressões em estruturas com bacias de dissipação inclinadas ainda é bastante reduzido.

Para compreender o comportamento do sistema extravasor como um todo, uma das metodologias de abordagem hidráulica é isolar e analisar o comportamento das pressões gerado unicamente pelo escoamento livre, ou seja, o fluxo em alta velocidade escoando sobre a calha do descarregador de cheias sem interferências a jusante.

Devido ao perfil curvo do vertedouro, o escoamento gera forças centrífugas que alteram a pressão da água sobre o concreto, resultando em valores que se afastam do cálculo hidrostático convencional. Segundo Chow (1959) e Baptista e Lara (2010), as curvaturas verticais da estrutura impõem o não paralelismo das linhas de corrente, caracterizando uma mudança para o escoamento curvilíneo. Diferente dos trechos retilíneos de baixa declividade, onde impera o regime hidrostático, em zonas curvas há a incidência de um fator de correção da pressão (ΔP). Dessa forma, a pressão corrigida (P') é obtida através da equação 1.

$$P' = P \pm \Delta P \quad \text{Eq. 1}$$

A estimativa do valor deste fator de correção (acréscimo ou decréscimo) é inversamente proporcional ao raio de curvatura da estrutura, conforme expresso pela equação 2.

$$\Delta P = \frac{h \cdot v^2}{g \cdot R} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde P' é a pressão corrigida (m.c.a.), P é a pressão hidrostática (m.c.a.), ΔP é o fator de correção da pressão (m.c.a.), h é a profundidade do escoamento, v é a velocidade média (m/s), g é a aceleração da gravidade (m/s²) e R é o raio de curvatura (m).

Fisicamente, em curvas convexas, existe um fator de redução da pressão hidrostática. No entanto, nas curvas côncavas, há um fator adicional de sobrepressão centrífuga. Somado a isso, a operação com comportas parcialmente abertas pode gerar zonas de sucção (pressões negativas) críticas logo no início da estrutura, onde as curvas de transição são convexas.

LinFu e Jie (1985) consideram que escoamentos em curvas verticais de barragens podem ser considerados escoamentos planos irrotacionais. Desta maneira, a partir da consideração de que, em teoria, as linhas de corrente podem ser admitidas como concêntricas à curva vertical, os autores apresentam um coeficiente de pressão máxima devida a força centrífuga, representado pela razão entre o valor da máxima pressão e a diferença entre a carga hidráulica no ponto de análise a profundidade neste mesmo ponto.

O equacionamento teórico dessas pressões, muitas vezes, torna-se inviável ou impreciso em geometrias complexas sob altas velocidades, tornando indispensável o uso de modelos físicos reduzidos. O presente estudo baseia-se em dados piezométricos extraídos de ensaios em um modelo físico parcial bidimensional (escala de redução 1:40) representativo do sistema extravasor da Usina Hidrelétrica (UHE) Foz do Chapecó. A geometria modelada compreende uma soleira com perfil tipo Creager, curvas de concordância verticais, uma bacia de dissipação inclinada e uma soleira terminal em aliche.

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um método prático para calcular as pressões médias em um sistema extravasor com bacia de dissipação inclinada, tendo por base a estrutura da UHE Foz do Chapecó, olhando exclusivamente para a condição de escoamento livre sem a formação de ressalto hidráulico. Esse artigo busca contribuir com os dados encontrados a partir do trabalho de Oliveira (2023), baseando-se somente na parte da pressão média no escoamento livre em um plano inclinado.

MÉTODOS

Os dados analisados neste estudo foram obtidos a partir de um modelo físico reduzido bidimensional, construído na escala 1:40 e instalado no extinto Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE), no Rio de Janeiro. O modelo representa parte do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, operando sob o critério de semelhança do número de Froude, que é a condição padrão para modelagem de escoamentos de superfície livre regidos, principalmente, por forças inerciais e gravitacionais.

A estrutura é composta por um vertedouro com perfil Creager, controlado por comportas radiais, seguido de uma bacia de dissipação em declive. Para reduzir os efeitos de parede do canal de ensaio e simular com fidelidade o comportamento hidrodinâmico real, a calha do modelo foi projetada contemplando um vão central completo e duas metades de vão nas laterais (representando uma fração dos 15 vãos existentes no protótipo). A figura 1 ilustra a instalação experimental.

Dessa forma, o sistema extravasor foi dividido em quatro trechos (Figura 2). A escolha de quais piezômetros fariam parte de cada trecho foi baseada puramente na física do escoamento local, agrupando as regiões onde a pressão sofria o mesmo tipo de influência geométrica. Buscou-se, também, nas regiões de transições verticais côncavas, a subdivisão do trecho contemplando tomadas de pressão a montante e a jusante do ponto central da concavidade, ou da troca brusca de direção do escoamento no trecho 4.



Figura 1. Modelo físico parcial reduzido do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó em vista de perfil (a) e de jusante para montante (b).

Os dados de pressão média foram obtidos diretamente dos ensaios no modelo físico, considerando quatro vazões distintas. Ao analisar graficamente como as pressões se comportam ao longo de toda a extensão da calha, identificou-se a necessidade de processar esses dados agrupando-os por zonas de comportamento semelhante.

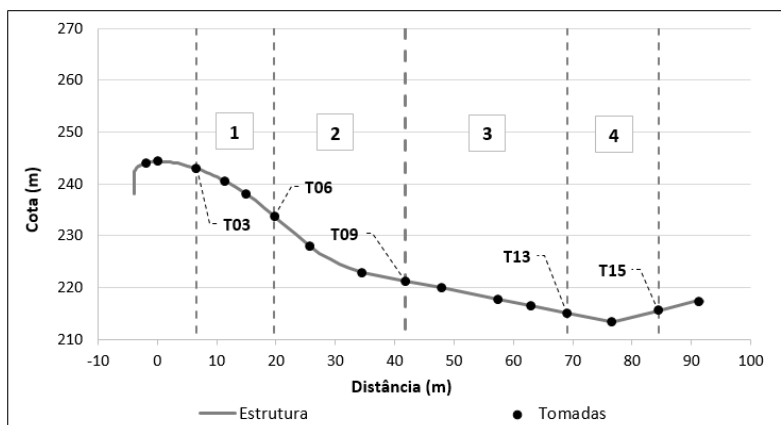


Figura 2. Divisão do sistema extravasor utilizado na análise das pressões médias.

Trecho 1: Refere-se ao segmento da estrutura compreendido entre as tomadas T03 e T06, inteiramente sobre o perfil da soleira Creager, iniciando-se logo a jusante do batente da comporta.

Trecho 2: Refere-se ao segmento da estrutura compreendido entre as tomadas T06 e T09, iniciando junto à curva de concordância entre a soleira Creager e a bacia em declive.

Trecho 3: Abrange a parte da estrutura localizada entre as tomadas T09 e T13, completamente posicionado sobre a bacia de dissipação em declive.

Trecho 4: Refere-se ao segmento da estrutura compreendido entre as tomadas T13 e T15, completamente posicionado sobre a soleira terminal.

Para a previsão teórica das pressões nas curvas de concordância (Trechos 2 e 4), o cálculo convencional utilizando o raio da calha subestima os valores reais. Para corrigir essa diferença, adotou-se um raio de curvatura virtual (R_{virtual}), parametrizado em função da altura crítica do escoamento (h). A sobrepressão gerada pela força centrífuga da água contra o fundo é calculada pela Equação 2, substituindo o raio de curvatura real (R) pelo raio virtual (R_{virtual}), a qual permitiu traçar uma "linha de base" teórica aderente aos dados medidos no modelo físico.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A complexidade da distribuição de pressões médias, ilustradas pela Figura 3, exigiu a divisão metodológica do sistema extravasor em quatro segmentos analíticos distintos, conforme descrito na metodologia.

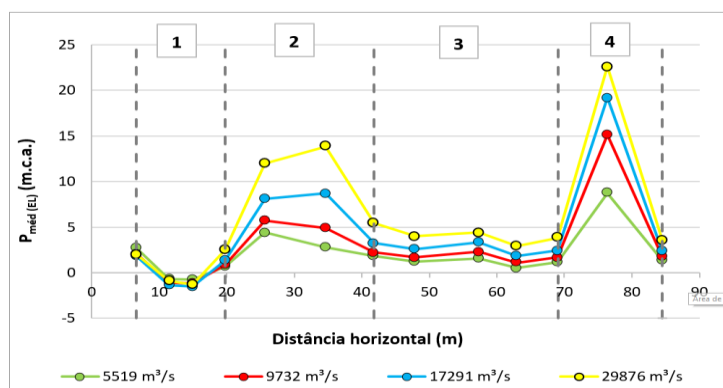


Figura 3. Pressões médias medidas sob condições de escoamento sem formação de ressalto

No Trecho 1, as elevadas velocidades e a pequena profundidade do escoamento geraram as menores pressões do sistema, aproximando-se de valores sub atmosféricos. No Trecho 3, por ser um trecho retilíneo, as medições confirmaram que a pressão de fundo acompanha a ação do peso da lâmina d'água, seguindo a distribuição hidrostática corrigida pela inclinação do canal.

As divergências analíticas se concentraram nas zonas de concavidade. Para estimar as pressões nos Trechos 2 e 4, verificou-se que a utilização do raio de curvatura real subestimou a sobrepressão gerada pela aceleração centrífuga da água contra o fundo. Essa subestimativa representa um risco para o projeto, pois negligencia os esforços reais atuantes sobre a estrutura.

De maneira geral, a adoção do equacionamento matemático baseado no Raio de Curvatura Virtual ($R_{virtual}$) para o cálculo do fator de correção da pressão (ΔP), em substituição ao Raio de Curvatura Real (R) da Eq. 2 apresentou um melhor ajuste aos dados obtidos em modelo. A Figura 4 ilustra o comportamento experimental e as equações de ajuste propostas neste estudo.

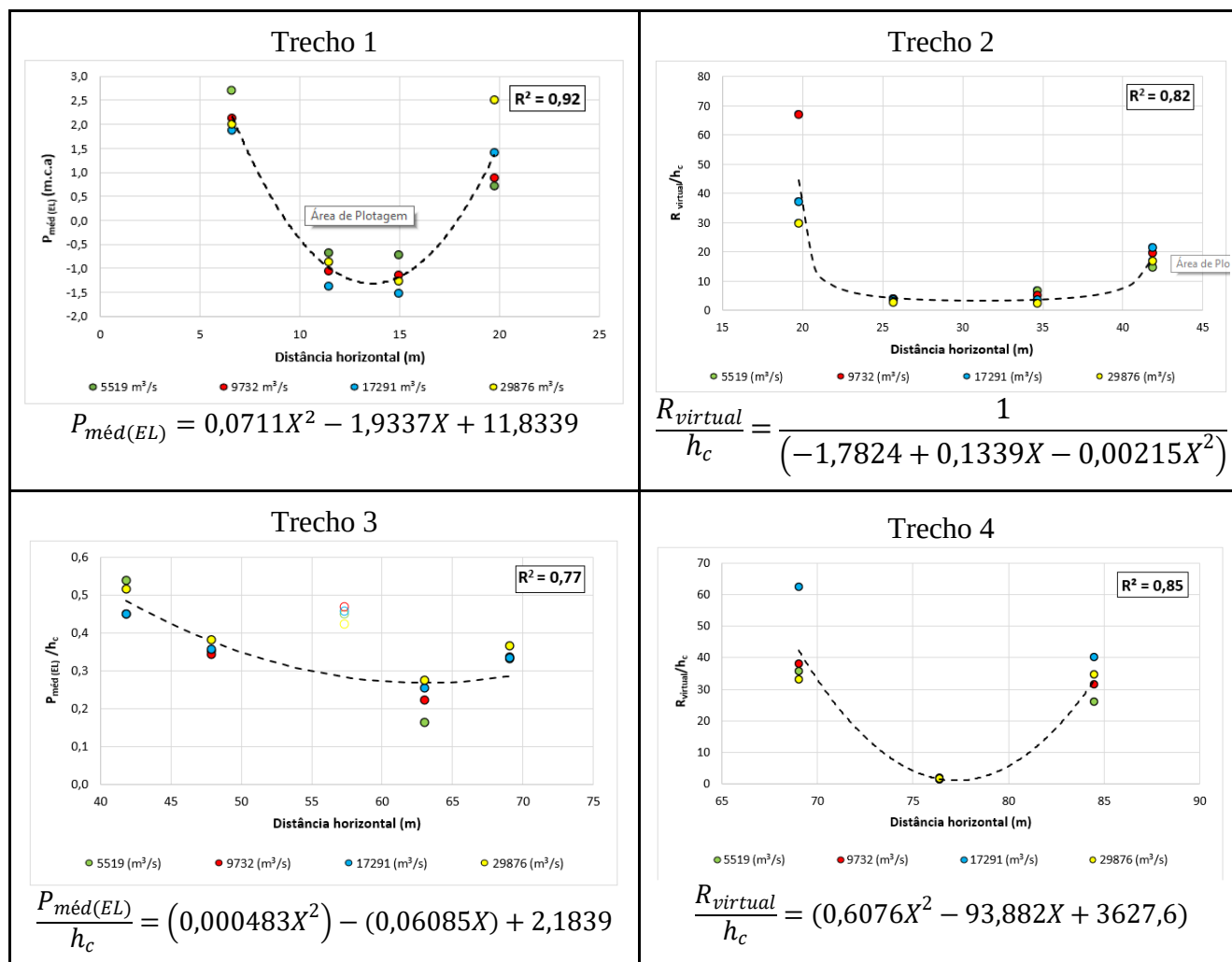


Figura 4 - Comportamento experimental das pressões e as equações de ajuste propostas neste estudo

No Trecho 1, a curva de regressão modela a queda abrupta das pressões médias. Embora o perfil Creager seja projetado para manter a aderência do escoamento, a abertura parcial das comportas impõe uma elevada carga de pressão a montante. Esse efeito ejeta o fluxo com velocidades iniciais superiores às de uma descarga livre padrão, provocando o seu descolamento e justificando as pressões sub atmosféricas registradas.

No Trecho 2 o escoamento sofre forte aceleração centrífuga. A aplicação da teoria clássica com o raio geométrico subestima a sobrepressão resultante. Para contornar essa defasagem, a regressão adota o Raio de Curvatura Virtual ($R_{virtual}$), parametrizado pela altura crítica do escoamento (h_c). O ajuste matemático reflete o fenômeno físico: a maior influência corretiva (menores valores de $R_{virtual}$) concentra-se no centro da curva, onde o impacto do fluxo é mais severo. Adicionalmente, a análise

evidenciou que, em vazões reduzidas na zona de transição inicial, o efeito centrífugo torna-se nulo (com $R_{virtual}$ tendendo ao infinito). Esse comportamento exige rigor na aplicação das equações, especialmente na adoção dos sinais do fator de correção positivos para zonas côncavas e negativos para as transições convexas.

No Trecho 3 a regressão expressa a pressão de forma adimensional. Fisicamente, espera-se que o aumento de energia cinética ao longo do declive resulte na redução progressiva das cargas de pressão. O modelo matemático, no entanto, apresentou maior dispersão em relação aos dados medidos. Esse comportamento é justificado pelos efeitos de contorno: as extremidades do segmento retilíneo sofrem influências residuais das concavidades adjacentes. Notadamente, a transição abrupta para a soleira terminal provoca uma elevação de pressão a jusante que o polinômio de ajuste não captura de forma integral. Ademais, anomalias pontuais de medição, como o pico atípico registrado no meio da rampa (tomada T11), foram excluídas do processamento para preservar a representatividade física do escoamento principal. Justifica-se a exclusão dos resultados experimentais obtidos neste ponto central do trecho 3 a partir da expectativa de que neste trecho, o escoamento encontra-se sob efeito de remanso, já distante das curvas de concordância vertical a montante e a jusante, o que não justificaria tal elevação nas pressões.

No Trecho 4 o escoamento sofre uma nova deflexão expressiva. À semelhança da curva inicial, a geometria local foi equacionada sob a teoria de curvas verticais. Essa abordagem justifica-se fisicamente pois as linhas de corrente não acompanham vértices agudos, mas sim assumem curvaturas contínuas devido à inércia do fluxo. A regressão do Raio de Curvatura Virtual ($R_{virtual}$) capturou essa dinâmica: a maior solicitação hidrodinâmica, traduzida pelos menores valores calculados de $R_{virtual}$, incidiu sobre a Tomada central (T14), ponto de máxima concavidade do segmento. Dada essa configuração geométrica convergente, o modelo matemático adotou sinais positivos para o fator de correção, quantificando com precisão o pico final de sobrepressão antes do lançamento do escoamento a jusante.

CONCLUSÃO

A segmentação do sistema extravasor em quatro zonas permitiu isolar e identificar os fenômenos físicos que regem o escoamento livre. No trecho inicial da soleira (Trecho 1), a rápida aceleração do fluxo resultou em pressões próximas ao vácuo parcial, confirmando o risco de cavitação e a necessidade de rigor operacional e especificação adequada de materiais adotados nessas áreas. Já na rampa em declive (Trecho 3), o escoamento atingiu estabilidade hidrostática, validando o uso de cálculos simplificados para trechos retilíneos inclinados.

Nas zonas de curvatura vertical (Trechos 2 e 4), a aplicação do Raio de Curvatura Virtual ($R_{virtual}$) corrigiu, de forma eficaz, as estimativas geradas pelo cálculo convencional baseado exclusivamente na geometria física da estrutura. Esse ajuste matemático, parametrizado pela altura crítica, garantiu que os erros de previsão permanecessem abaixo de 1 m.c.a. (em protótipo) em relação aos dados coletados no modelo físico, demonstrando que o método é sensível o suficiente para prever a sobrepressão centrífuga.

A metodologia apresentada estabelece uma linha de base técnica indispensável para a previsão de pressões médias sobre estruturas descarregadoras de cheias, tipicamente conformadas por curvas de transição verticais (côncavas ou convexas). Os resultados sugerem a viabilidade de aplicar o ajuste por Rvirtual em outras obras de geometria similar, servindo como uma ferramenta de previsão segura, de baixo custo computacional e com aderência à realidade hidrodinâmica observada em laboratório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), pelo apoio fornecido durante a pesquisa, a extinta Eletrobras-Furnas e a Foz do Chapecó Energia S.A., pela disponibilização dos dados e ao PIBIC CNPq-UFRGS pela concessão de bolsa.

REFERÊNCIAS

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

CHOW, V. T. *Open Channel Hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 1959.

DAI PRÁ, M. **Uma abordagem para determinação das pressões extremas decorrentes do ressalto hidráulico**. 2011. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

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.

LINFU, Z.; JIE, X. Estudo das Características Hidráulicas e de Cavitação de Curvas Verticais em Canais considerando o Escoamento Bidimensional. *Shuili Xuebao*, Beijing (6), 1984, p. 19 a 27 – Traduzido do chinês por J. A. Pinto de Campos, Engenheiro Civil, Técnico Assessor, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1985.

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.

MARQUES, M. G.; DRAPEAU, J.; VERRETTE, J. L. Flutuação de pressão em bacia de dissipação com ressalto hidráulico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 45-64, 1997.

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.