



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA



MATHEUS KUNRATH OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DO
SISTEMA EXTRAVASOR DA UHE FOZ DO CHAPECÓ**

Porto Alegre

2023

MATHEUS KUNRATH OLIVEIRA

**ANÁLISE DAS PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DO SISTEMA
EXTRAVASOR DA UHE FOZ DO CHAPECÓ**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

Orientador: Mauricio Dai Prá

Co-orientador: Renato Steinke Júnior

Porto Alegre

2023

Kunrath Oliveira, Matheus
Análise das pressões médias ao longo do sistema
extravasador da UHE Foz do Chapecó / Matheus Kunrath
Oliveira. -- 2023.
122 f.

Orientador: Mauricio Dai Prá.

Coorientador: Renato Steinke Júnior.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hidrica,
Porto Alegre, BR-RS, 2023.

1. Modelo físico reduzido. 2. Bacia de dissipação
inclinada. 3. Pressões médias. 4. Metodologia de
previsão. I. Dai Prá, Mauricio, orient. II. Steinke
Júnior, Renato, coorient. III. Título.

MATHEUS KUNRATH OLIVEIRA

ANÁLISE DAS PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DO SISTEMA EXTRAVASOR
DA UHE FOZ DO CHAPECÓ

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Hídrico.

Porto Alegre, 06 de setembro de 2023.

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá – IPH/UFRGS

Orientador

Me. Renato Steinke Júnior – Doutorando PPGRHSA – IPH/UFRGS

Coorientador

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – IPH/UFRGS

Examinador

Prof. Dr.^a Mariane Kempka - UTFPR

Examinadora

*In memoriam de Aida Gomes e
Laurindo Kunrath.*

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é a finalização de uma etapa de muito esforço e desenvolvimento acadêmico, profissional e pessoal. Diante disso, minha sincera gratidão:

À Eliana Maria Kunrath, minha mãe, pelo amor incondicional, por todo o apoio, carinho, compreensão e valores ensinados. Agradeço por todo suporte dado, desde sempre, sem o qual, nada disso seria possível. Esse trabalho tem meu nome, mas sinta-se como parte dele e parte de mim. Muito obrigado, amo você;

Ao Jorge Oliveira, meu pai, pelo amor incondicional, carinho, admiração, incentivo, compreensão e conselhos. Agradeço pelo suporte que sempre me deu e pela disponibilidade de ser, sempre, meu melhor ombro amigo. Muito obrigado, amo você;

À Elaine Beatriz Kunrath, minha madrinha, pelo amor incondicional, carinho, apoio, compreensão e incentivo ao meu desenvolvimento intelectual. Agradeço pelo exemplo de força diária e pelo zelo que sempre teve pela nossa família. Muito obrigado, amo você;

À Fabiane Aquino da Silva, minha namorada, por todo o amor, carinho, ajuda, companheirismo e incentivo ao longo de todo o tempo juntos. Agradeço também pelas discussões e ensinamentos que me proporcionam evolução pessoal e social. Muito obrigado, amo você;

Ao Pedro Guido Mottes Bassegio, meu irmão de coração e jornada, pela amizade, companheirismo, pelo exemplo ético, acadêmico e profissional e pela ajuda indispensável, principalmente, no início da fase acadêmica, possibilitando a concretização deste sonho e a oportunidade de mudança de vida;

Ao professor Mauricio Dai Prá, pelos ensinamentos, pela amizade, pelo incentivo, pela compreensão e pela humanidade. Meus agradecimentos e admiração;

Ao Renato Steike Júnior, pela orientação e pela amizade, contribuindo de forma fundamental no desenvolvimento do trabalho, na parte técnica e pessoal;

Ao professor Marcelo Giulian Marques, pela amizade, pelos conselhos, pelo incentivo e pela honra de ouvir suas histórias e ensinamentos;

À Flávia Lorena Medeiros Pereira, pela amizade e pelo excelente trabalho na organização e processamento inicial dos dados;

Ao Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), pelas oportunidades oferecidas, amizades conquistadas e ensinamentos repassados durante, aproximadamente, meus quatro anos como bolsista;

À Furnas Centrais Elétricas S.A. e Foz do Chapecó Energia S.A., pela disponibilização dos dados e apoio à pesquisa;

À Água e Solo Estudos e Projetos LTDA, pela oportunidade de estágio e desenvolvimento profissional.

“Que o sucesso hoje seja a norma, não a exceção.”

Oprah Winfrey

RESUMO

O sistema extravasor de um barramento é um componente de segurança com a finalidade de escoar, de forma controlada, o excesso de água proveniente de eventos de cheia. Devido à elevada carga energética do escoamento sobre esse componente, faz-se necessária a utilização de algum mecanismo de dissipação, sendo, comumente, empregado o ressalto hidráulico sobre a bacia de dissipação. Contudo, ainda que seja bem dimensionado, o sistema extravasor pode ser submetido a esforços hidrodinâmicos extremamente intensos e variáveis, podendo acarretar avarias estruturais. Dessa forma, torna-se importante prever os esforços que estas estruturas deverão suportar. O objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma metodologia para estimar as pressões médias no sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, com uma bacia de dissipação inclinada, em condições de formação de ressalto, com diferentes graus de submergência. No estudo foram usados dados de pressão média coletados, com piezômetros, em ensaios realizados em um modelo físico parcial e reduzido do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó. Foram ensaiadas quatro vazões diferentes, cada uma com uma condição de escoamento livre e três condições com formação de ressalto hidráulico em diferentes graus de submergência ($S=1, 1,2$ e $1,4$), totalizando 16 combinações. Nos ensaios sob condições de escoamento livre foram medidas as lâminas d'água médias, para cada vazão, usando pontas linimétricas. A metodologia proposta baseia-se na estimativa das pressões médias a partir da perspectiva de sobreposição de efeitos. Assim, assume-se que a pressão média atuante na estrutura ($P_{\text{méd (total)}}$) resulta da adição de duas componentes: uma proveniente do escoamento livre ($P_{\text{méd (EL)}}$) e outra da formação do ressalto hidráulico ($P_{\text{méd (RH)}}$). De forma geral, os resultados demonstraram que a metodologia proposta apresenta melhores estimativas para as menores vazões ensaiadas, bem como, para o grau de submergência de 1,2. Além disso, verificou-se que ao longo do vertedouro e da bacia de dissipação, houve uma melhor aderência entre os dados medidos e calculados, em comparação com a região da soleira terminal.

Palavras-chave: modelo físico reduzido; bacia de dissipação inclinada; pressões médias; metodologia de previsão

ABSTRACT

The spillway system of a dam is a safety component designed to release, in a controlled manner, the surplus water from flood events. Due to the high energy imposed by the flow on this component, a dissipation mechanism becomes necessary, with the hydraulic jump stilling basin being a commonly employed solution. However, even if it is correctly designed, the spillway system can be subjected to extremely intense and variable hydrodynamic forces, which can lead to structural damage. Therefore, the estimation of the forces that these structures must withstand is important. In this context, the objective of this study was to develop a methodology to estimate the average pressures on the spillway system of the Foz do Chapecó Hydropower Plant, with a sloping stilling basin, under hydraulic jump conditions, with different degrees of submergence. Average pressure data collected with piezometers in tests conducted on a partial and reduced physical model of the Foz do Chapecó Hydropower Plant spillway system were used. Four different flow rates were tested, each one with a condition of supercritical free flow (no downstream control) and three conditions of hydraulic jump occurrence at different degrees of submergence ($S=1, 1,2, \text{ and } 1,4$), resulting in 16 combinations. In the tests under supercritical free flow conditions, average water depths were measured for each flow rate using point gauges. The proposed methodology is based on the estimation of average pressures from the perspective of the superposition of effects. Thus, it is assumed that the average pressure acting on the structure ($P_{\text{méd (total)}}$) results from the summation of two components: one from supercritical free flow ($P_{\text{méd (EL)}}$) and another one from the hydraulic jump ($P_{\text{méd (RH)}}$). In general, the results showed that the proposed methodology provides better estimates for the lower tested flow rates, as well as for the submergence degree of 1,2. Additionally, it was found that along the spillway and the dissipation basin, there was better agreement between measured and calculated data when compared to the end sill region.

Keywords: reduced physical model; sloping stilling basin; average pressures; estimation methodology.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Vertedouro de soleira delgada (esquerda) e o respectivo vertedouro de soleira normal (direita). Fonte: Porto (2006).....	26
Figura 2. Perfil Creager, Scimemi e perfil inferior de um jato livre sobre uma soleira delgada. Fonte: Adaptado de Pimenta (1981).....	27
Figura 3. Perfil Creager com localização, e sentido, dos eixos x e y. Fonte: Azevedo Netto e Fernández (2015).....	27
Figura 4. Região do perfil com propensão a pressões negativas, a partir de uma abertura parcial da comporta. Fonte: USBR (1973)	30
Figura 5. Distribuição de pressões ao longo de um vertedouro. Fonte: Baptista e Lara (2010) adaptado de Crausse (1951)	31
Figura 6. Bacia de dissipação, tipo SAF. a) Vista em planta; b) Vista em perfil. Fonte: Blaisdell (1948) apud Hager (1992).....	33
Figura 7. Bacia II – USBR. Fonte: Ortiz (1982)	35
Figura 8. Bacia III – USBR. Fonte: Ortiz (1982)	36
Figura 9. Bacias de dissipação inclinadas positivamente (a) e negativamente (b). Fonte: Ortiz (1982)	36
Figura 10. Delimitação das zonas de rolo e transição de um ressalto hidráulico. Fonte: Teixeira (2003)	37
Figura 11. Classes do ressalto hidráulico, sendo: a) Ondulante; b) Fraco; c) Oscilante; d) Estável e e) Forte. Fonte: Adaptado de Chow (1959)	38
Figura 12. Esquematização de um ressalto hidráulico com indicação das seções onde ocorrem as alturas conjugadas. Fonte: Baptista e Lara, 2010.	40
Figura 13. Esquematização do comprimento do ressalto (L_j), comprimento do rolo (L_r) e alturas conjugadas. Fonte: Nóbrega (2014) adaptado de Rajaratnam (1967)	42
Figura 14. Comprimento do ressalto em função do número de Froude na seção de entrada e da profundidade conjugada lenta, juntamente da relação com as classes do fenômeno. Fonte: Porto (2006) adaptado de Chow (1959)	43
Figura 15. Perfil superficial médio, para ressaltos clássicos, em função do número de Froude rápido. Fonte: Bakhmeteff e Matzke (1936) apud Chow (1959).....	45
Figura 16. Esquematização da perda de carga no ressalto hidráulico, relacionando-a às alturas conjugadas. Fonte: Elevatorski (1959)	46

Figura 17. Localização de um ressalto, formado a jusante de um vertedouro, relacionada à altura conjugada lenta (y_2) e altura de lâmina d'água final do escoamento a jusante (y'_2). Fonte: Baptista e Lara (2010).....	47
Figura 18. Tipos de ressalto em canais inclinados. Fonte: Hager (1992).....	49
Figura 19. Relação adimensional entre as alturas conjugadas, número de Froude no início do ressalto e a declividade do canal. Fonte: Chow (1959).....	50
Figura 20. Relação adimensional entre o comprimento do ressalto, o número de Froude rápido e a declividade do canal. Fonte: USBR (1955) apud Chow (1959)	51
Figura 21. Esquemática dos parâmetros adimensionais. Fonte: Lemos (1975)	53
Figura 22. Distribuição de pressões médias ao longo do perfil do vertedouro, para a posição do batente $A/H_d = -0,1$. Fonte: Lemos (1981).....	53
Figura 23. Distribuição de pressões médias ao longo do perfil do vertedouro, para a posição do batente $A/H_d = 0,2$. Fonte: Lemos (1981).....	54
Figura 24. Pressões médias adimensionalizadas. Fonte: Marques et al. (1997)	55
Figura 25. Dissociação e sobreposição de efeitos sobre a pressão média. Fonte: Dai Prá (2011)	55
Figura 29. UHE Foz do Chapecó. Fonte: Júnior. Acesso em: 10/04/2023.	57
Figura 30. Modelo físico parcial reduzido do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó em vista de perfil (a) e de jusante para montante (b).....	58
Figura 31. Esquemática, em perfil e escala de protótipo, das estruturas estudadas, inseridas no canal de alimentação (a) e em maior detalhamento do sistema extravasor (b). Fontes: FURNAS (a) e Autor (b).	60
Figura 32. Esquemática da posição das tomadas de medição.....	62
Figura 33. Divisão, do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, adotada para a análise da lâmina d'água média, em condição de escoamento livre.....	65
Figura 34. Divisão, do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, adotada para a análise da parcela de pressão média proveniente do escoamento livre.	69
Figura 35. Lâminas d'água médias, medidas nos ensaios com escoamento livre, apresentadas na forma de cota da linha d'água (a) e valor bruto (b).	76
Figura 36. Pressões médias, na forma de cota piezométrica, medidas durante os ensaios realizados com as vazões: a) 5519 m ³ /s, b) 9732 m ³ /s, c) 17291 m ³ /s e d) 29876 m ³ /s.	79

Figura 37. Pressões médias medidas sob condições de escoamento livre.....	81
Figura 38. Ajuste realizado para o trecho 1 da análise de lâmina d'água média.	82
Figura 39. Ajuste realizado para o trecho 2 da análise de lâmina d'água média.	83
Figura 40. Ajuste realizado para o trecho 1 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.	85
Figura 41. Ajuste realizado para o trecho 2 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.	86
Figura 42. Ajuste realizado para o trecho 3 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.	87
Figura 43. Ajuste realizado para o trecho 4 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.	89
Figura 44. Ajuste realizado para o trecho 1 da análise de pressão média associada ao ressalto hidráulico.....	90
Figura 45. Ajuste realizado para o trecho 2 da análise de pressão média associada ao ressalto hidráulico.....	91
Figura 46. Ajuste realizado para a determinação, aproximada, da posição de início do ressalto hidráulico.....	92
Figura 47. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do escoamento livre.....	96
Figura 48. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, para a condição operacional.....	100
Figura 49. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, para a condição de $S=1,2$	103
Figura 50. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, para a condição de $S=1,4$	105
Figura 51. Resultados finais da aplicação da metodologia proposta em condições de operação.	108
Figura 52. Representação gráfica dos erros absolutos obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para a condição operacional.	109

Figura 53. Resultados finais da aplicação da metodologia proposta em condições de $S=1,2$	111
Figura 54. Representação gráfica dos erros absolutos obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para a condição de $S=1,2$	112
Figura 55. Resultados finais da aplicação da metodologia proposta em condições de $S=1,4$	114
Figura 56. Representação gráfica dos erros absolutos obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para a condição de $S=1,4$	115

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais características geométricas do modelo reduzido parcial e do protótipo.	58
Tabela 2. Condições propostas e aplicadas para cada ensaio.	61
Tabela 3. Distâncias das tomadas de pressão e lâmina d'água média, medidas a partir da crista do vertedouro.....	62
Tabela 4. Informações dos medidores de vazão utilizados.	63
Tabela 5. Resumo das subdivisões longitudinais aplicadas nas análises.	74
Tabela 6. Ponto de início do ressalto hidráulico identificado a partir das pressões médias.....	80
Tabela 7. Resumo das equações de aplicação da metodologia proposta.....	93

LISTA DE SIGLAS

IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LAHE	Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas
LOH	Laboratório de Obras Hidráulicas
SAF	Saint Anthony Falls
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidrelétrica
USBR	United States Bureau of Reclamation
WES	Waterways Experiment Station

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área molhada
A_b	Abertura de comporta
B	Largura do canal
C'_p	Coeficiente de flutuação de pressão
C_0	Coeficiente de descarga
F_1	Froude na seção de entrada do ressalto hidráulico
F_2	Froude na seção de saída do ressalto hidráulico
G_0	Parâmetro relacionado à abertura da comporta
g	Aceleração da gravidade
H	Carga hidráulica
H_d	Carga de projeto
H_o	Carga sobre o centro do orifício oriundo da abertura da comporta.
H_1	Carga hidráulica na entrada do ressalto
H_2	Carga hidráulica na saída do ressalto
h	Profundidade da lâmina d'água
h_c	Altura crítica
$h_{\text{méd}}$	Lâmina d'água média
h_n	Altura normal do escoamento
h_1 ou y_1	Altura conjugada rápida
h_2 ou y_2	Altura conjugada lenta
I	Declividade do fundo do canal
L_{ef}	Largura efetiva
L_j	Comprimento total do ressalto
L_r	Comprimento da zona de rolo
NA_{jus}	Nível de água a jusante do sistema extravasor
NA_{res}	Nível de água no reservatório a montante
n	Coeficiente de rugosidade de Manning
P	Pressão hidrostática ou pseudo-hidrostática
P'	Pressão corrigida em uma curva vertical

$P_{\text{méd (EL)}}$	Parcela de pressão média proveniente do escoamento livre
$P_{\text{méd (RH)}}$	Parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico
$P_{\text{méd (Total)}}$	Pressão média total ocorrente no local da tomada de pressão
P_{xr}	Pressão média em um ponto distante X unidades do início do ressalto hidráulico
Q	Vazão volumétrica
Q_d	Vazão de projeto
Q_{modelo}	Vazão escoada no modelo
$Q_{\text{protótipo}}$	Vazão escoada em protótipo
q	Vazão específica
R	Raio de curvatura do fundo da estrutura
R_h	Raio hidráulico
R_{virtual}	Raio virtualmente assumido pelas linhas de corrente do fluxo
S	Grau de submergência do ressalto hidráulico
v	Velocidade média na seção
v_1	Velocidade média na entrada do ressalto hidráulico
X	Distância horizontal medida a partir da crista
X_r	Distância horizontal a partir do início do ressalto
X_1	Posição aproximada de início do ressalto
x	Distância horizontal
y	Distância vertical
y_j	Altura do ressalto hidráulico
y'_2	Lâmina d'água a jusante do ressalto
γ	Peso específico do fluido
ΔH	Perda de carga no ressalto hidráulico
ΔP	Fator de aumento ou redução de pressão em curvas verticais
η	Eficiência do ressalto hidráulico
σ	Desvio padrão da amostra de pressões

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	22
2.	OBJETIVOS	24
2.1.	OBJETIVO GERAL.....	24
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1	ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS	25
3.1.1.	Soleira normal e Perfis Clássicos	25
3.1.2.	Relação entre vazão e pressões	28
3.1.3.	Curvas Verticais	30
3.2	ESTRUTURAS DE DISSIPAÇÃO – BACIA DE DISSIPAÇÃO	32
3.2.1.	Bacias de dissipação horizontais	33
3.2.2.	Bacias de dissipação inclinadas	36
3.3.	RESSALTO HIDRÁULICO	36
3.3.1.	Classes de ressalto	38
3.3.2.	Alturas conjugadas	39
3.3.3.	Altura do ressalto	41
3.3.4.	Comprimentos característicos	42
3.3.5.	Perfil superficial.....	44
3.3.6.	Perda de carga e Eficiência	45
3.3.7.	Localização do ressalto hidráulico	47
3.3.8.	Ressalto em canais inclinados.....	48
3.4.	ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS - PRESSÕES	51
3.4.1.	Pressões médias	52
4.	METODOLOGIA	56
4.1	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	56
4.2	AQUISIÇÃO DE DADOS - ENSAIOS.....	60
4.3	ANÁLISE DOS DADOS	63
4.3.1.	Lâmina d'água média	65
4.3.1.1	Trecho 1	66
4.3.1.2	Trecho 2	66
4.3.2.	Pressões médias	68
4.3.2.1.	Escoamento livre	68

4.3.2.1.1.	Trecho 1	69
4.3.2.1.2.	Trecho 2	69
4.3.2.1.3.	Trecho 3	71
4.3.2.1.4.	Trecho 4	71
4.3.3.	Ressalto hidráulico	72
4.3.3.1.1.	Trechos 1 e 2.....	72
4.3.3.1.2.	Posição de início do ressalto	73
4.3.4.	Resumo analítico	74
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
5.1	RESULTADOS EXPERIMENTAIS – DADOS BRUTOS.....	75
5.1.1.	Lâmina d'água média	75
5.1.2.	Pressões médias	77
5.2	AJUSTES E EQUACIONAMENTOS	81
5.2.1.	Lâmina d'água média	81
5.2.1.1.	Trecho 1	82
5.2.1.2.	Trecho 2	82
5.2.2.	Pressões médias	84
5.2.2.1.	Escoamento livre	84
5.2.2.1.1.	Trecho 1	84
5.2.2.1.2.	Trecho 2	86
5.2.2.1.3.	Trecho 3	87
5.2.2.1.4.	Trecho 4	88
5.2.2.2.	Ressalto hidráulico	89
5.2.2.2.1.	Trecho 1	90
5.2.2.2.2.	Trecho 2	91
5.2.2.2.3.	Posição de início do ressalto	92
5.3	METODOLOGIA PROPOSTA PARA PREVISÃO DE PRESSÕES MÉDIAS – RESUMO	93
5.4	APLICAÇÃO	94
5.4.1.	Escoamento livre	94
5.4.2.	Ressalto hidráulico	97
5.4.2.1.	Submergência $S=1$	98
5.4.2.2.	Submergência $S=1,2$	101
5.4.2.3.	Submergência $S=1,4$	103

5.4.3.	Pressão média total e erros absolutos	106
5.4.3.1.	Submergência $S=1$	106
5.4.3.2.	Submergência $S=1,2$	110
5.4.3.3.	Submergência $S=1,4$	113
6.	CONCLUSÕES	116
7.	REFERÊNCIAS	118

1. INTRODUÇÃO

Vertedouros e dissipadores de energia hidráulica consistem nos principais componentes do sistema extravasor de um barramento. A bacia de dissipação por ressalto hidráulico é o dissipador comumente empregado. Em conjunto, estas estruturas possuem a finalidade de liberar o excesso de água, em eventos de cheia, de forma segura, sem comprometer a estabilidade estrutural do empreendimento como um todo.

Embora as estruturas mencionadas sejam componentes de segurança em projetos de aproveitamento hídrico, em alguns casos, estas podem estar sujeitas à ocorrência de manifestações patológicas estruturais. Ainda que sejam bem dimensionados, tanto vertedouro, quanto bacia de dissipação, podem ser submetidos a esforços hidrodinâmicos extremamente intensos e variáveis durante seus regimes de operação. Dessa forma, torna-se importante e desafiador prever os esforços que ambas as estruturas deverão suportar e, assim, buscar a melhor solução que seja segura e econômica.

Devido à sua característica de alta perda de carga, o ressalto hidráulico é comumente utilizado como elemento dissipador em bacias de dissipação, por exemplo, a jusante de vertedouros. Porém, segundo Dai Prá (2011), as bruscas flutuações de pressão, velocidade e nível d'água, juntamente com a intensa incorporação de ar, que o fenômeno provê ao escoamento, possibilitam a manifestação de problemas como fadiga, subpressão e cavitação junto à estrutura.

Em bacias de dissipação por ressalto hidráulico projeta-se a formação e desenvolvimento do fenômeno sobre a laje de concreto, projetada para tal finalidade. Contudo, sabe-se que a posição de ocorrência do ressalto é dependente da profundidade de jusante, ou do grau de submergência, condicionados pela curva-chave do rio no local do barramento, que, por vezes, é associada a alto grau de incerteza. Assim, o ressalto hidráulico pode sofrer, constantemente, tendências de afogamento e de translação para jusante, neste caso, exigindo estruturas adicionais para contê-lo.

Ao longo dos anos, diversos autores têm estudado os efeitos externos e internos do ressalto hidráulico, visando complementar a compreensão dos

esforços que este exerce na bacia de dissipação. Neste âmbito, a utilização de modelos físicos reduzidos é amplamente difundida.

Autores como Marques et al. (1997), Teixeira (2008), Dai Prá (2011), entre outros, fizeram uso de modelagem física para investigar o regime de pressões em um ressalto hidráulico formado em bacia de dissipação horizontal. Entretanto, o número de trabalhos que investiga o regime de pressões em bacias de dissipação inclinadas, ainda, é reduzido.

Diante do exposto, o presente trabalho propõe analisar o regime de pressões médias atuantes sobre um sistema extravasor, composto por vertedouro e bacia de dissipação por ressalto hidráulico, com estrutura inclinada, avaliando a influência de diferentes graus de submergência e propondo uma metodologia de previsão das referidas pressões.

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho encontram-se, a seguir, divididos em objetivo geral e objetivos específicos. Estes, foram classificados de acordo com sua ordem de importância e prioridade.

2.1.OBJETIVO GERAL

O trabalho objetiva o desenvolver uma metodologia para estimar as pressões médias no sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, em condições de formação de ressalto com diferentes graus de submersão.

2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- Identificar, por meio de análise gráfica, trechos, do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, com comportamentos semelhantes na distribuição longitudinal das pressões médias e lâmina d'água média;
- Desenvolver metodologia para estimar as pressões médias atuantes sobre o sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó em condições de escoamento livre, ou seja, sem a formação de ressalto hidráulico;
- Analisar o efeito adicional gerado pelo ressalto hidráulico, ao escoamento livre;
- Desenvolver metodologia para estimar as pressões médias geradas pelo efeito adicional proveniente do ressalto hidráulico, ao escoamento livre, ocorrentes sobre o sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó;
- Identificar as relações estabelecidas entre pressões e níveis de submersão do ressalto hidráulico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item encontram-se os principais referenciais teóricos consultados e utilizados na realização deste estudo. Assim, são enfatizados conceitos sobre vertedouros, bacias de dissipação, ressalto hidráulico, entre outros.

3.1 ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS

Os vertedouros são estruturas extremamente importantes em sistemas extravasores de barragens. A partir do projeto e operação adequados dessas estruturas, volumes excedentes de água, provenientes de eventos de cheia, podem ser conduzidos, de forma controlada, a jusante, para a estrutura de dissipação e, posteriormente, ao leito natural do rio.

Em contrapartida, o escoamento sobre esta estrutura foi, e é, tema frequente de estudos, como, por exemplo, os realizados por Creager e Justin (1950), Lemos (1981) e Arauz (2005), visto que pode apresentar regime de elevadas velocidades e pressões. Tais características, supracitadas, podem prover o aparecimento de avarias superficiais e/ou estruturais ao longo do vertedouro.

Nos itens seguintes, são apresentados alguns tópicos sobre vertedouros e o fluxo de água sobre estes, enfatizando os aspectos mais relevantes para este estudo.

3.1.1. Soleira normal e Perfis Clássicos

O regime de pressões sobre a soleira de um vertedouro é alvo de atenção dos projetistas estruturais. Devido a essa característica, foram desenvolvidas teorias sobre soleiras normais e, a partir disso, geometrias clássicas de perfis.

Segundo Porto (2006), a geometria das soleiras normais baseia-se na ideia de otimizar as características hidrodinâmicas do perfil, promovendo o assentamento do fluxo de água sobre a estrutura, a prevenção de pressões negativas, que podem gerar a cavitação, danificando o concreto no local, e a maximização do coeficiente de descarga do vertedouro. Ao longo de toda a soleira normal, para a condição hidráulica de projeto, pode-se verificar que a estrutura está submetida à pressão atmosférica local.

Informa-se que as soleiras classificadas como normais foram estabelecidas a partir de uma determinada vazão, associada à uma determinada carga, escoando sobre uma soleira delgada. A linha inferior deste jato livre, dá origem à soleira normal, conforme pode ser observado na Figura 1, na qual a carga hidráulica, representada por H_d , corresponde à carga de projeto, sendo essa, associada à vazão de projeto, Q_d (PORTO, 2006).

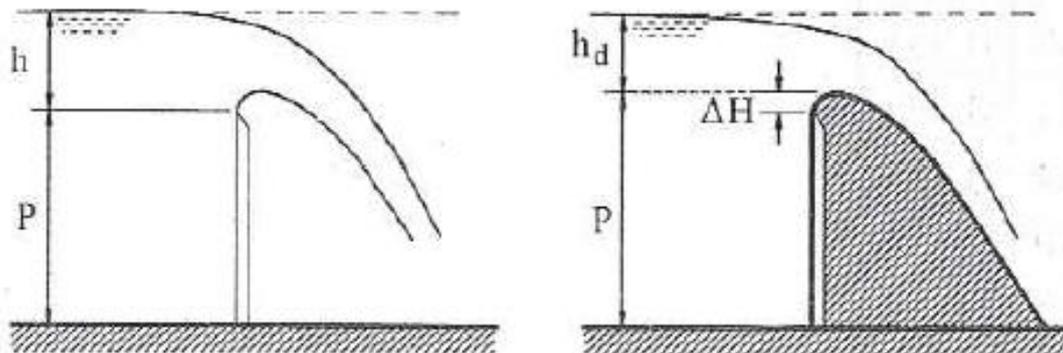


Figura 1. Vertedouro de soleira delgada (esquerda) e o respectivo vertedouro de soleira normal (direita). Fonte: Porto (2006)

O perfil Creager pode ser classificado como uma das geometrias mais clássicas para soleiras de vertedouros, sendo significativamente próxima da geometria de soleira normal. Esse perfil difere-se da geometria de soleira normal por penetrar, ligeiramente, o perfil inferior do respectivo jato vertente sobre a soleira delgada, ao invés de tangenciá-lo (CREAGER e JUSTIN,1950 apud ARAUZ, 2005).

Embora seja uma das mais tradicionais geometrias de perfil, o Creager é apenas um, dentre outros perfis desenvolvidos. Segundo Abecasis (1961), Scimemi desenvolveu em suas pesquisas uma proposta de perfil que veio a se tornar outra geometria altamente reconhecida, sendo intitulada com o próprio nome do autor.

O perfil de Scimemi possui elevada semelhança com o perfil Creager, conforme pode ser visualizado na Figura 2. Nesta ilustração, Pimenta (1981) esquematizou o perfil Creager, Scimemi e o perfil inferior do jato vertente sobre uma soleira delgada, definidos para uma determinada vazão. A partir da observação desta figura, Arauz (2005) afirma que as pressões ocorrentes sobre o perfil Creager devem ser levemente superiores às ocorrentes sobre o perfil

Scimemi, visto que penetra mais na lâmina escoada. Ainda, na Figura 2 são apresentadas as equações representativas do perfil Creager e Scimemi.

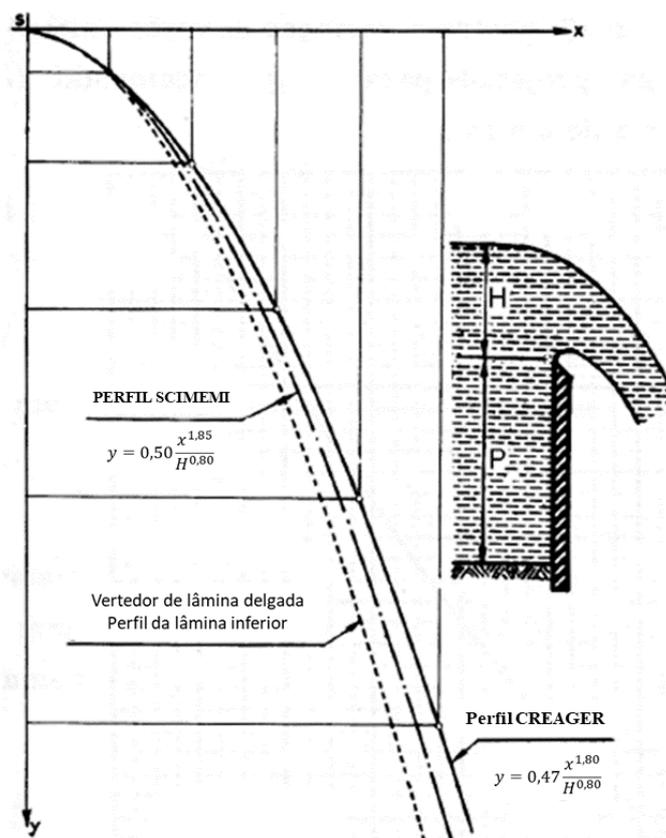


Figura 2. Perfil Creager, Scimemi e perfil inferior de um jato livre sobre uma soleira delgada. Fonte: Adaptado de Pimenta (1981).

Para o perfil Creager, a origem das coordenadas x e y situa-se, em x , no ponto localizado na seção do paramento vertical de montante e, em y , na altura da crista do vertedouro. A posição, exata, pode ser observada, e melhor compreendida, na Figura 3.

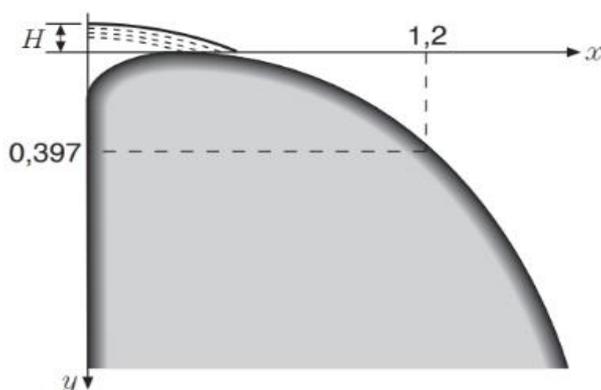


Figura 3. Perfil Creager com localização, e sentido, dos eixos x e y . Fonte: Azevedo Netto e Fernández (2015)

Adicionalmente, Porto (2006) menciona o perfil desenvolvido pela Waterways Experiment Station (WES), do USBR, como outro exemplo de geometria clássica para a estrutura de vertedouros. O perfil WES possui grande semelhança com a geometria proposta por Scimemi. Comparando-se a equação desses perfis, destaca-se a diferença no expoente ao qual é elevada a carga de projeto, de 0,80 (Scimemi) para 0,85 (WES), e a localização da origem das coordenadas x e y , sendo, para o perfil WES, exatamente na crista do vertedouro. Ainda, no trecho entre a crista do vertedouro e o paramento vertical de montante, a geometria é determinada a partir da combinação de dois raios distintos, também, dependentes da carga de projeto.

3.1.2. Relação entre vazão e pressões

O conhecimento de parâmetros como vazão, profundidades, pressões, velocidades, entre outros, é de fundamental importância durante o dimensionamento de um vertedouro, bem como para sua correta operação. Geralmente, estas características associam-se com a carga sobre a soleira e/ou a carga de projeto.

A vazão escoada sobre a soleira de um vertedouro livre obedece a lei exibida na Equação 1. Por outro lado, para um vertedouro regulado por comporta, o escoamento é regido pela lei apresentada na Equação 2. Como pode ser observado nas equações apresentadas, a vazão vertida é dependente, dentre outros parâmetros, da carga aplicada à estrutura, sendo esta comumente relacionada às pressões ocorrentes.

$$Q = C_0 \cdot L_{ef} \cdot H^{3/2} \quad \text{Equação 1}$$

$$Q = C_0 \cdot G_0 \cdot L_{ef} \cdot \sqrt{2gH_0} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

Q é a vazão vertida (m^3/s);

C_0 é o coeficiente de descarga (adimensional);

L_{ef} é a largura efetiva (m);

H é a carga hidráulica sobre a crista (m.c.a.);

G_0 é um parâmetro relacionado com a abertura da comporta (m);

g é a aceleração da gravidade (m/s^2);

H_o é a carga hidráulica sobre o centro do orifício oriundo da abertura da comporta (m.c.a.).

Conforme abordado, a geometria do perfil do vertedouro possui relação direta com as pressões sobre a estrutura. No geral, a estrutura é projetada com o objetivo de prevenção à pressões negativas, entretanto, em determinadas circunstâncias podem ocorrer tendências de descolamento da lâmina d'água e, conseqüentemente, sucção no local.

Em um vertedouro de soleira normal e operando livremente, sem controle por comportas, podem ocorrer situações em que a carga de operação é menor ou maior que a carga de projeto. Quando $H < H_d$, a soleira é definida em situação comprimida, funcionando com pressões sempre positivas, superiores à atmosférica local. Contudo, quando $H > H_d$, a soleira é definida em situação deprimida, estando submetida a pressões negativas, ou inferiores à atmosférica local. Visando a prevenção máxima contra a ocorrência de cavitação na estrutura, se estabelece, como norma, a operação do extravasor com uma carga limite de $1,33h_d$ (PORTO, 2006).

Em vertedouros regulados por comportas, a relação entre a vazão escoada e as pressões sobre a superfície difere-se da abordagem utilizada na análise de vertedouros de soleira livre. Segundo o USBR (1973), em ocasiões nas quais um vertedouro de soleira normal é submetido, e operado, a uma razão elevada entre a carga e a abertura de comporta, ocorrem pressões negativas na região imediatamente a jusante da comporta. Conforme analisado no estudo mencionado, as pressões de sucção que ocorrem são da ordem de um décimo da carga de projeto, quando o vertedouro está submetido a esta carga. A esquematização da região de pressões negativas é exibida na Figura 4.

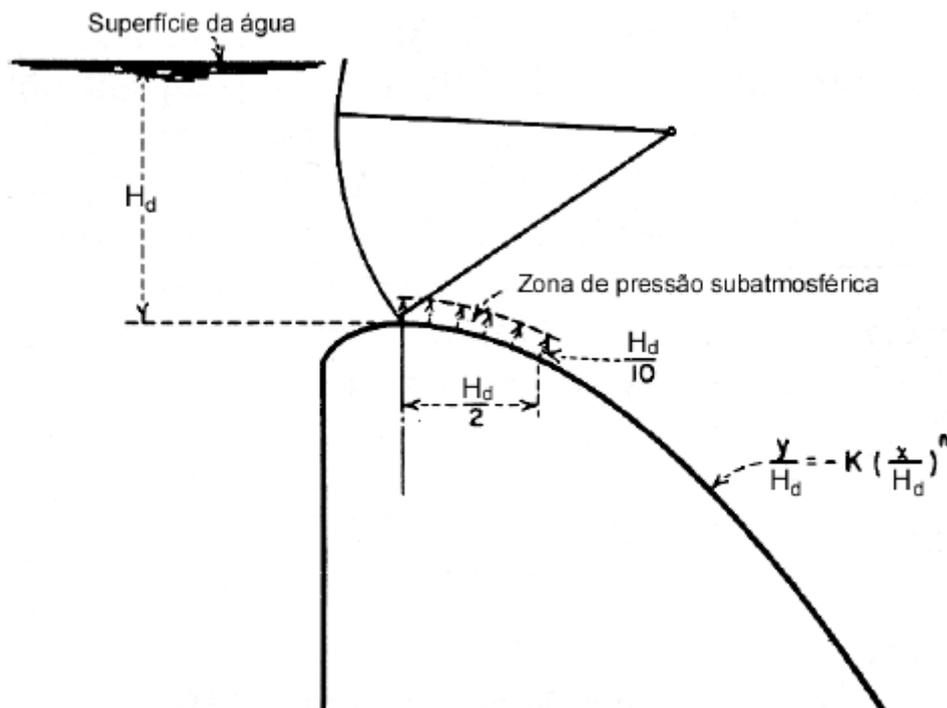


Figura 4. Região do perfil com propensão a pressões negativas, a partir de uma abertura parcial da comporta. Fonte: USBR (1973)

3.1.3. Curvas Verticais

Os vertedouros apresentados não se tratam de estruturas com fundo retilíneo. Observa-se que as próprias soleiras consistem em curvas convexas, sob o ponto de vista vertical. Por outro lado, ao final da calha dos vertedouros são projetadas curvas de concordância, sendo curvas côncavas, que unem o trecho declivoso à bacia de dissipação.

Segundo Baptista e Lara (2010), as curvaturas verticais da estrutura de vertedouros, ou de outros tipos de canais, impõem o não paralelismo das linhas de corrente. Portanto, nestes locais, há uma mudança de caracterização do escoamento de paralelo para curvilíneo. Como consequência, as mudanças nas linhas de corrente resultam em alterações nos principais parâmetros característicos do escoamento, como velocidades e pressões.

Com relação às pressões ocorrentes no escoamento em canais, quando bem desenvolvidos, em trechos verticalmente retilíneos e de baixa declividade, o regime é hidrostático ou pseudo-hidrostático. Porém, em trechos verticalmente curvos, Baptista e Lara (2010) informam a existência de um fator de aumento ou redução de pressão no local (ΔP), devido à presença de forças inerciais. Conforme observa-se na Figura 5, em uma esquematização do regime de

pressões sobre diferentes partes de um vertedouro, em curvas convexas existe um fator de redução da pressão hidrostática. No entanto, nas curvas côncavas, há um fator adicional de sobrepressão.

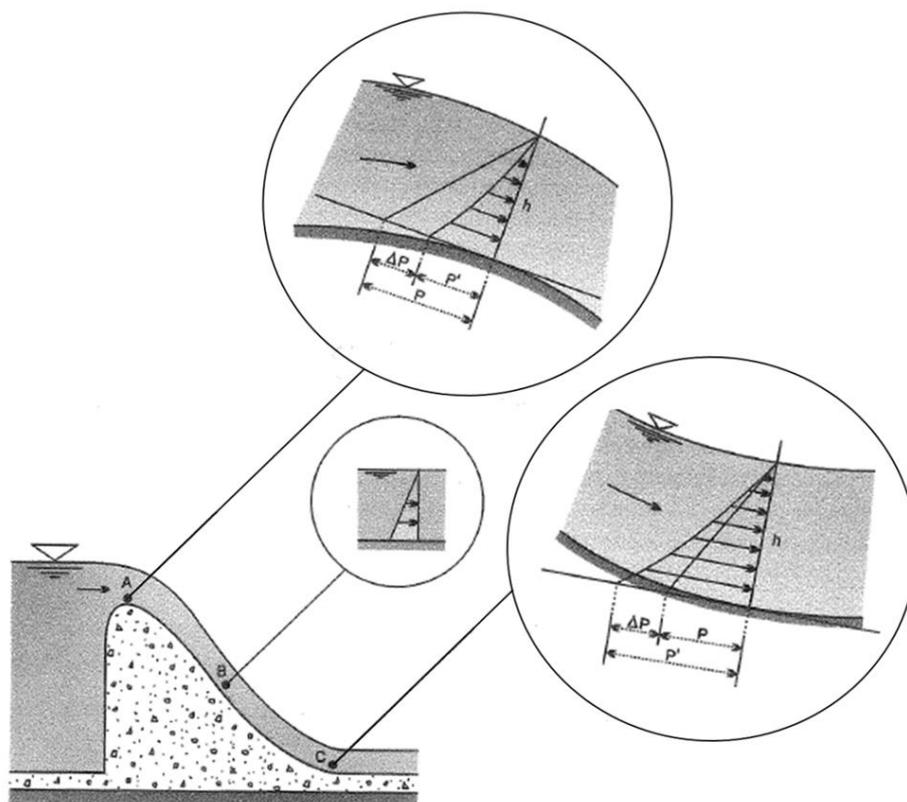


Figura 5. Distribuição de pressões ao longo de um vertedouro. Fonte: Baptista e Lara (2010) adaptado de Crausse (1951)

Assim, entende-se a pressão corrigida (P'), conforme a Equação 3. A estimativa do fator de acréscimo ou decréscimo de pressão é realizada a partir da Equação 4. Nota-se que, entre outros parâmetros, esse fator é inversamente relacionado com o raio de curvatura da estrutura (ou das linhas de corrente), sendo considerado positivo para fundos côncavos e negativo para convexas (BAPTISTA E LARA, 2010).

$$P' = P \pm \frac{\Delta P}{\gamma} \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{h v^2}{g R} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

P' é a pressão corrigida (m.c.a.);

P é a pressão hidrostática ou pseudo-hidrostática (m.c.a.);

ΔP é o fator de correção da pressão (Pa);

γ é peso específico do fluido (N/m³);

h é a profundidade da lâmina d'água (m);

v é a velocidade média do escoamento (m/s);

R é o raio de curvatura do fundo (m).

3.2 ESTRUTURAS DE DISSIPACÃO – BACIA DE DISSIPACÃO

A jusante de estruturas extravasoras, a carga de energia cinética pode atingir valores extremamente elevados em função das velocidades atuantes no local. Desta forma, visando a proteção estrutural do empreendimento e do leito natural receptor das águas, é indispensável a inclusão de um sistema de dissipação de energia no projeto (BAPTISTA E LARA, 2010).

Segundo Ortiz (1982), de uma maneira geral, as estruturas de dissipação podem ser classificadas em dois grupos:

1. No primeiro grupo enquadram-se as bacias de dissipação, tendo como principais funções a contenção e proteção da zona de dissipação de energia hidráulica. Neste tipo de estrutura, o ressalto hidráulico é largamente utilizado como mecanismo dissipador de energia.
2. No segundo grupo enquadram-se estruturas como, por exemplo, o salto esqui, as quais são projetadas para executar o lançamento de um jato para longe do empreendimento. Portanto, a dissipação ocorre em uma região mais afastada, evitando processos erosivos ao pé da barragem. O mecanismo de dissipação, neste caso, dá-se pelo atrito com o ar, durante a projeção do escoamento, e pelo impacto hidrodinâmico, quando o jato encontra a lâmina d'água a jusante.

Embora citadas, não serão abordadas, neste estudo, as estruturas classificadas no segundo grupo. Quanto às estruturas classificadas no primeiro grupo, ainda, conforme Ortiz (1982), existem dois tipos principais, sendo: bacias com formação de ressalto hidráulico e conchas para contenção do ressalto afogado (“Roller-Bucket”). As bacias de dissipação com formação de ressalto hidráulico serão abordadas de forma mais detalhada, em nos subitens seguintes.

3.2.1. Bacias de dissipação horizontais

Segundo Elevatorski (1959), define-se uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico como a estrutura na qual todo ou parte deste fenômeno é contida. Quando situada a jusante de vertedouros, esta estrutura encontra-se imediatamente após a curva de concordância, delimitando a área de dissipação de energia e conduzindo o escoamento ao leito natural do rio.

Dentre as possibilidades estruturais, há diferentes tipos de bacias de dissipação, podendo ser horizontais e inclinadas (positiva ou negativamente) e podendo, ou não, ter acessórios na sua composição. A partir disso, inúmeros pesquisadores e laboratórios experimentais desenvolveram diferentes padrões de bacias de dissipação por ressalto hidráulico. A seguir, brevemente, alguns dos padrões desenvolvidos são apresentados (HAGER, 1992).

a) Bacias Saint Anthony Falls (SAF)

A bacia de dissipação do tipo SAF é considerada a primeira estrutura com projeto padronizado e generalizado (BLAISDELL, 1948 apud HAGER, 1992). O modelo de bacia, esquematizado na Figura 6, é composto por fundo horizontal acrescido de acessórios combinados, como blocos de queda (1), blocos de dissipação (2) e soleira terminal (3).

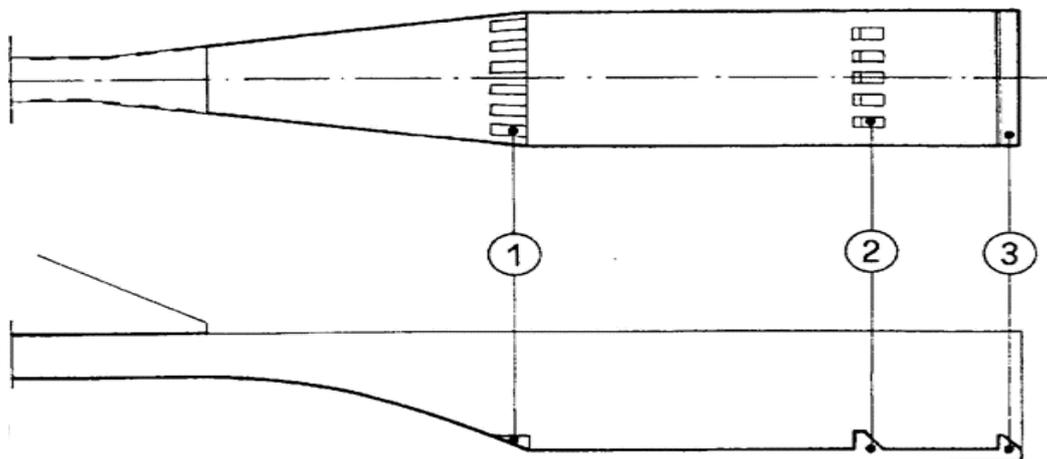


Figura 6. Bacia de dissipação, tipo SAF. a) Vista em planta; b) Vista em perfil. Fonte: Blaisdell (1948) apud Hager (1992)

Conforme Elevatorski (1959), os blocos de queda, instalados no início da bacia de dissipação, proporcionam o aumento da profundidade efetiva do escoamento no local, bem como a quebra, deste, em diversos jatos. Ainda, segundo o autor, o acessório é capaz de colaborar na formação da turbulência

necessária para a dissipação de energia, possibilitando o projeto de uma bacia de dissipação mais curta.

Quanto aos blocos de dissipação, Elevatorski (1959) afirma que possuem a finalidade de estabilizar a formação do ressalto hidráulico e aumentar a turbulência no local. Esses acessórios, também, possibilitam o projeto de uma bacia de dissipação mais curta, além de reduzirem a profundidade de água requerida a jusante, a fim de evitar a translação do ressalto.

Por fim, sobre a soleira terminal, o autor informa a existência de estruturas escalonadas, inclinadas ou dentadas, porém, sempre construídas na extremidade de jusante da bacia de dissipação. Como objetivos da soleira terminal, destacam-se o direcionamento do escoamento para cima, longe do leito do rio, a possibilidade de redução da profundidade requerida a jusante e, conseqüentemente, o aumento na eficiência do controle do ressalto hidráulico sobre a laje da bacia (ELEVATORSKI, 1959).

Ressalta-se que as descrições apresentadas para cada acessório presente no modelo de bacia tipo SAF, não se repetirão no detalhamento dos demais tipos. Isso se deve ao fato de que essas estruturas se repetem em outros tipos de bacia de dissipação, contudo, com funcionamento análogo.

b) Bacias United States Bureau of Reclamation (USBR)

As bacias do tipo USBR foram estudadas e apresentadas por Peterka (1984). Este tipo de bacia, na realidade, subdivide-se em 10 estruturas distintas sendo cada uma indicada para determinadas situações. A criação destes modelos generalizados de bacias de dissipação baseou-se em testes experimentais realizados ao longo dos anos pelo USBR.

Neste estudo, devido ao fato de não se tratar de um tema de importância central, serão abordadas apenas as bacias classificadas como I, II e III. Além disso, a partir das bacias IV, entende-se que as estruturas são indicadas para situações muito específicas, que fogem ao interesse deste estudo.

A bacia I consiste, possivelmente, no caso mais clássico das bacias de dissipação. As bacias enquadradas nesta classe tratam-se de lajes horizontais, sem a utilização de nenhum acessório. Esse tipo de estrutura é projetado para a formação do ressalto hidráulico clássico, tendo sua posição completamente regulada pelo nível de água a jusante da estrutura.

A bacia II consiste de uma estrutura recomendada para barragens altas, sendo considerada eficiente para vazões específicas de até $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e velocidades de aproximação de até 30 m/s . Conforme pode ser observado na Figura 7, a bacia II possui blocos de queda e soleira terminal dentada, em sua composição, visando elevar o desempenho do ressalto hidráulico formado e reduzir o comprimento total da bacia. Ressalta-se que, neste tipo de bacia, devido às situações para as quais é indicada, os blocos de dissipação não foram inclusos por alto potencial de danos por cavitação, em virtude das altas velocidades atingidas pelo escoamento (HAGER, 1992).

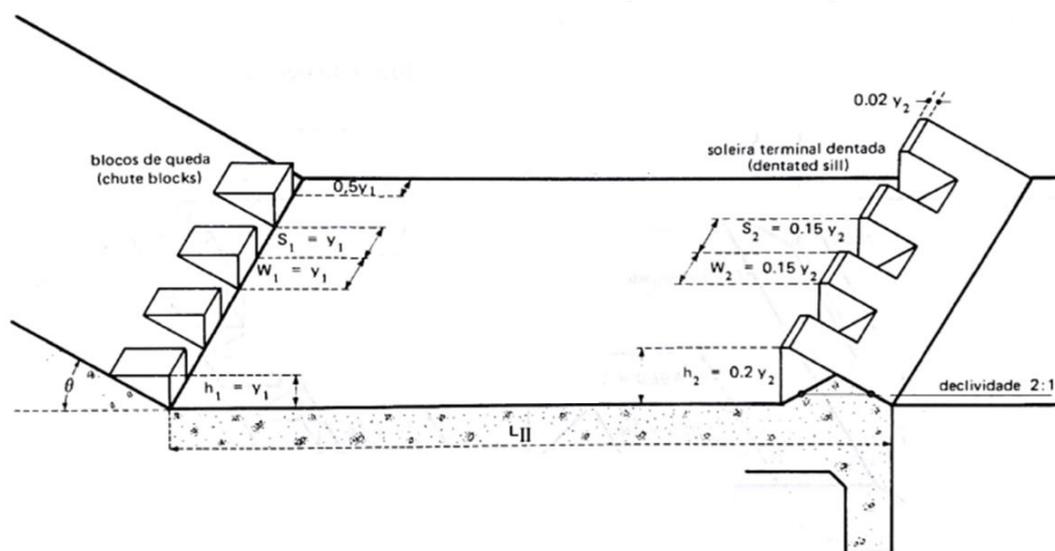


Figura 7. Bacia II – USBR. Fonte: Ortiz (1982)

A bacia III foi projetada a partir da constatação de que a bacia II estava demasiadamente conservadora para casos em que a velocidade de aproximação for inferior a 20 m/s . Desta forma, foram inclusos, no projeto, blocos de dissipação sobre a bacia. Segundo Bradley e Peterka (1957), com o conjunto de acessórios dispostos neste tipo de bacia (Figura 8) foi possível a minimização do comprimento da laje da bacia de dissipação. Nota-se a semelhança entre a bacia III (USBR) e a bacia SAF, apresentada anteriormente, exceto, principalmente, pela inclinação da soleira terminal.

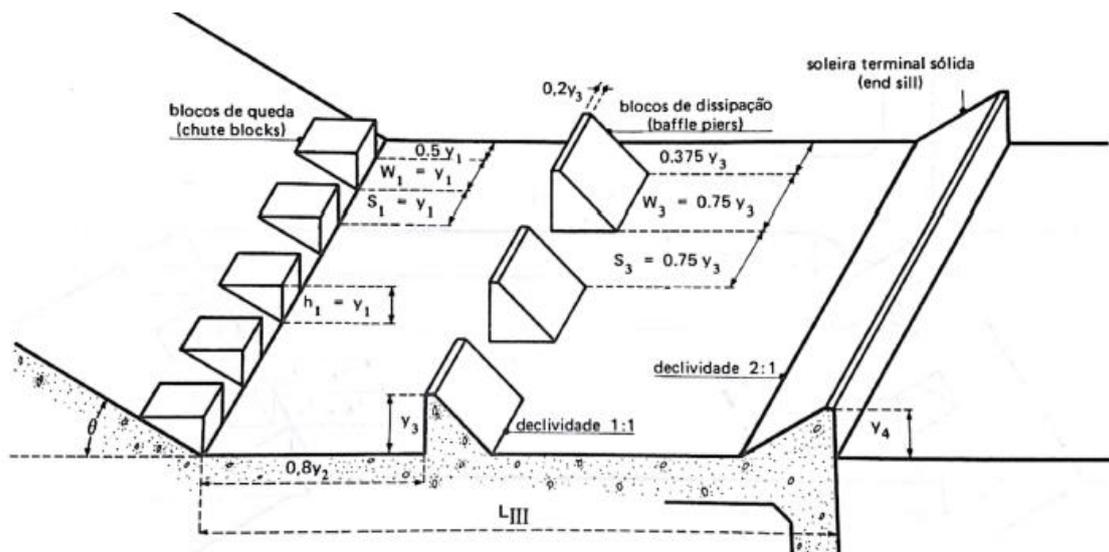


Figura 8. Bacia III – USBR. Fonte: Ortiz (1982)

3.2.2. Bacias de dissipação inclinadas

As bacias de dissipação expostas, até então, neste estudo, tratam-se de estruturas de fundo horizontal. É inegável que as bacias de fundo horizontal são os modelos mais estudados e, conseqüentemente, conhecidos, nesta área, entretanto, há casos em que o dissipador possui fundo inclinado. Conforme exposto na Figura 9, as bacias de dissipação podem ser inclinadas positiva ou negativamente.

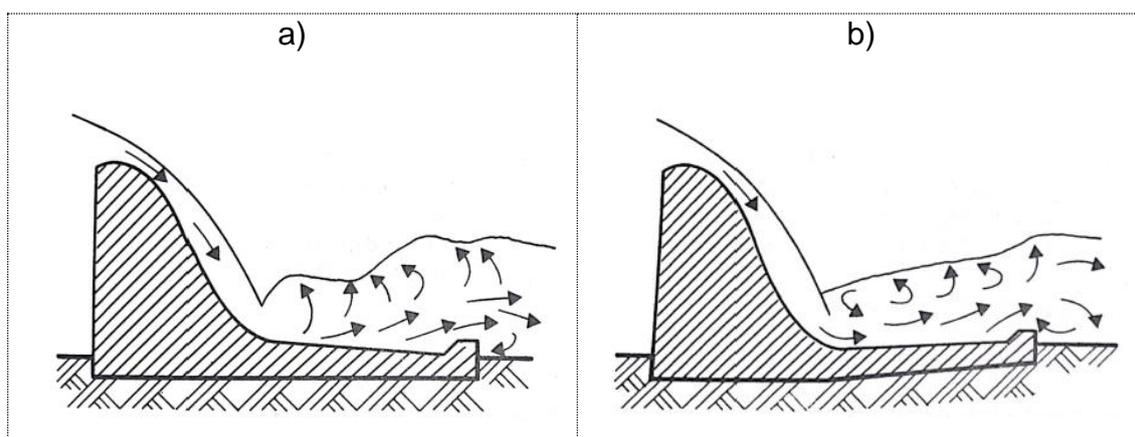


Figura 9. Bacias de dissipação inclinadas positivamente (a) e negativamente (b).
Fonte: Ortiz (1982)

3.3. RESSALTO HIDRÁULICO

O ressalto hidráulico consiste em um fenômeno caracterizado por uma brusca elevação do nível d'água, em uma curta distância, juntamente de intensa

turbulência e incorporação de ar ao escoamento. A ocorrência deste fenômeno é condicionada por uma transição de regime supercrítico (rápido) para subcrítico (lento), ocasionando grande dissipação de energia no local (PORTO, 2006).

Esta definição é complementada por Teixeira (2003), o qual indica a formação de uma zona de rolo e uma zona de transição, ou zona de subida de bolhas de ar, conforme pode ser observado na Figura 10. A zona de rolo corresponde ao local onde se dá a maior elevação da superfície d'água e aeração do escoamento. Por outro lado, na zona de transição, uma grande parcela do ar é liberada, a partir da subida das bolhas, e o escoamento encaminha-se para o regime normal.

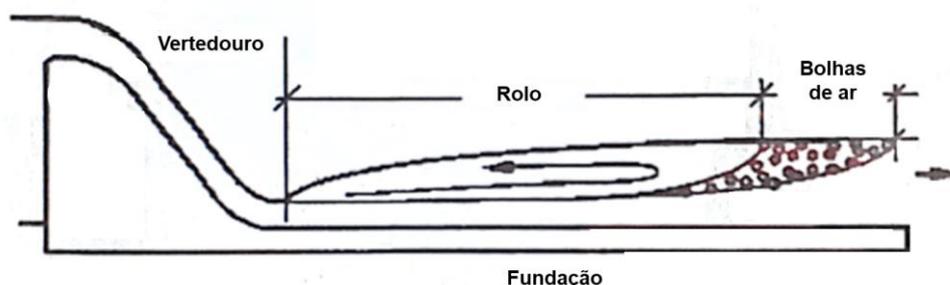


Figura 10. Delimitação das zonas de rolo e transição de um ressalto hidráulico. Fonte: Teixeira (2003)

Embora, na natureza, o ressalto hidráulico possua formação espontânea, devido às suas características, pode-se forçar a sua ocorrência em diversas aplicações e finalidades, oferecendo vantagens em determinados processos. No saneamento, na entrada de estações de tratamento de água (calha Parshall), o ressalto é induzido com a finalidade de prover uma boa mistura dos componentes químicos utilizados no processo de potabilização. Em vertedouros, e bacias de dissipação, estruturas em análise neste estudo, o ressalto hidráulico é empregado com a função de dissipação da energia cinética residual, reduzindo/anulando a ocorrência de erosão no pé da barragem ou no leito do canal de restituição, por exemplo (PORTO, 2006).

Atualmente, com segurança, pode-se afirmar que o ressalto é um dos fenômenos mais conhecidos e bem caracterizados na área da hidráulica, especialmente o caso clássico em canais horizontais e de seção transversal retangular. Assim, ao longo dos anos, diversos pesquisadores propuseram parâmetros de classificação e caracterização deste fenômeno, bem como

metodologias específicas para determiná-los. A seguir, serão abordados os parâmetros mais importantes relacionados ao estudo do ressalto hidráulico.

3.3.1. Classes de ressalto

Ainda que se trate do mesmo fenômeno, o ressalto hidráulico pode apresentar variações em suas principais características e formas. A partir de observações experimentais, em um dos clássicos trabalhos referentes ao tema, o USBR, através de Peterka (1984), propôs a classificação do ressalto em cinco classes distintas. A determinação, e limitação, de cada classe se dá a partir do número de Froude na seção de entrada do ressalto. Cabe salientar que a proposta de classificação, ilustrada na Figura 11, destina-se, principalmente, para fenômenos ocorridos em leito horizontal.

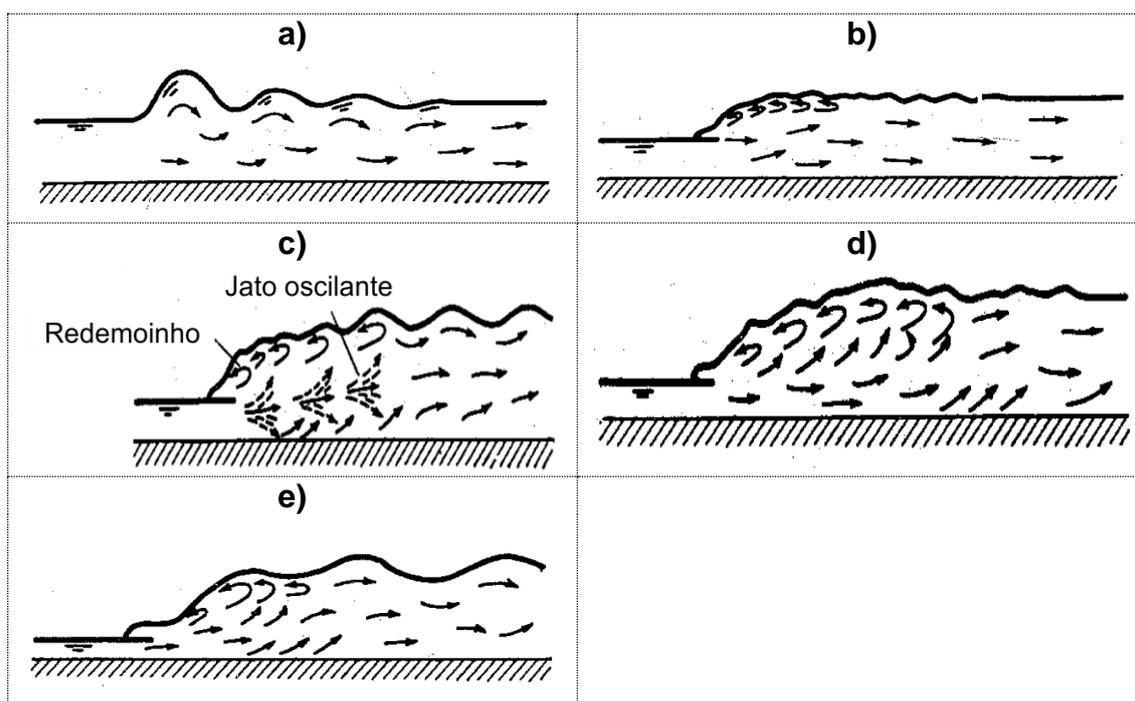


Figura 11. Classes do ressalto hidráulico, sendo: a) Ondulante; b) Fraco; c) Oscilante; d) Estável e e) Forte. Fonte: Adaptado de Chow (1959)

A seguir, encontram-se as descrições de cada classe apresentada.

- a) **Ressalto Ondulante:** Oscilações são observadas na superfície livre do escoamento, entretanto, assemelham-se à uma onda estacionária. Alguns autores classificam este tipo de ressalto como não verdadeiro.
- b) **Ressalto Fraco:** Aumento da formação de vórtices, quando comparada a classe anterior, contudo, a superfície livre ainda permanece calma. A

jusante, os perfis de velocidades apresentam razoável uniformidade. Os ressaltos classificados como fracos possuem baixa dissipação de energia, sendo esta, menos de 20% da energia disponível na seção de entrada.

- c) Ressalto Oscilante:** Desenvolvimento de jatos oscilantes, desde o fundo até a superfície livre. Ressalto começa a apresentar contornos mais característicos, porém com intensa instabilidade e oscilações não periódicas. Os ressaltos identificados nesta classificação tratam-se de fenômenos desafiadores aos projetistas estruturais, visto que possuem, também, tendência de propagação, podendo deslocar-se por quilômetros, gerando danos em leitos de areia e/ou rochas a jusante.
- d) Ressalto Estável:** A extremidade a jusante do conjunto de vórtices de superfície e o ponto no qual os jatos oscilantes de alta velocidade tendem a deixar o fluxo, coincidem na mesma seção. Este fato promove uma característica espacial de estacionariedade para os ressaltos desta classe, podendo, inclusive, receber a denominação de ressaltos estacionários. Desta forma, estes ressaltos possuem a tendência de serem menos sensíveis, por exemplo, às variações do nível d'água de jusante. Com relação à dissipação de energia, caracterizam-se sendo eficientes, perdendo entre 50 e 70% da energia de montante.
- e) Ressalto Forte:** Maiores dimensões, intensa vorticidade, jatos de alta velocidade propagando-se a longas distâncias, entre outros aspectos, caracterizam os ressaltos hidráulicos enquadrados nesta classe. Este tipo de ressalto impõe significativa turbulência ao escoamento a jusante. Embora seja brusco, exigindo estruturas mais robustas para suportá-lo, pode apresentar excelente efetividade na dissipação de energia (até 85%). Em contrapartida, segundo Porto (2006), seu uso não é indicado por causarem efeitos colaterais como abrasão e cavitação sobre as estruturas de dissipação (CHOW, 1959; ORTIZ, 1982; PORTO, 2006).

3.3.2. Alturas conjugadas

O ressalto hidráulico ocorre na mudança brusca de regime supercrítico para subcrítico. Sendo assim, pode-se afirmar que há um escoamento rápido a montante e um escoamento lento a jusante.

As alturas conjugadas consistem nas alturas de lâmina d'água imediatamente a montante e a jusante do ressalto hidráulico, ou seja, a lâmina de água no escoamento rápido (altura conjugada rápida, y_1) e no escoamento lento (altura conjugada lenta, y_2). Na Figura 12, encontra-se a esquematização de um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro, onde pode-se observar as alturas conjugadas (BAPTISTA E LARA, 2010).

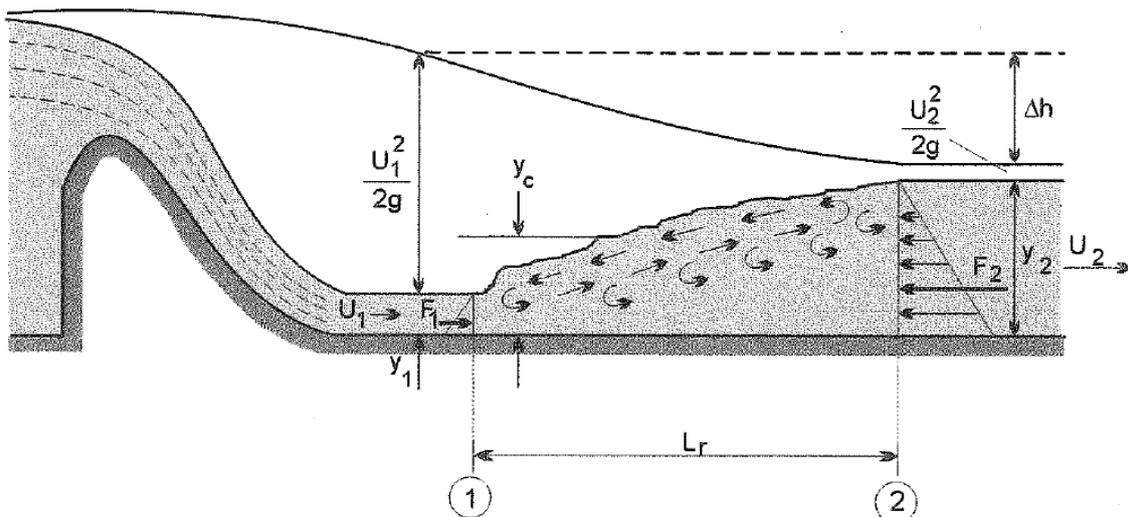


Figura 12. Esquematização de um ressalto hidráulico com indicação das seções onde ocorrem as alturas conjugadas. Fonte: Baptista e Lara, 2010.

O ressalto formado em canal horizontal e retangular, como ilustrado na Figura 12, trata-se do caso mais estudado, e melhor conhecido, sobre este fenômeno. Nestas condições, uma excelente estimativa das alturas conjugadas pode ser obtida pela clássica Equação de Bélanger (1828), onde o autor relacionou estes parâmetros ao número de Froude (Equação 5). O equacionamento proposto por Bélanger pode ser observado a seguir, nas versões que utilizam o número de Froude rápido (Equação 6) e o número de Froude lento (Equação 7) (ORTIZ, 1982).

$$F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}} \quad \text{Equação 5}$$

$$\frac{y_2}{y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right) \quad \text{Equação 6}$$

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1 \right) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

h é a altura de lâmina d'água na seção (m);

y_1 é a altura conjugada rápida, na entrada do ressalto (m);

y_2 é a altura conjugada lenta, na saída do ressalto (m);

F_1 é o número de Froude rápido, na seção do y_1 (adimensional);

F_2 é o número de Froude lento, na seção do y_2 (adimensional).

Para o correto entendimento e aplicação desta metodologia, cabe salientar que a relação foi obtida a partir da análise do fenômeno relacionada à quantidade de movimento aplicada ao volume de controle entre as seções das alturas conjugadas. Ainda, o autor adotou as seguintes simplificações e hipóteses:

- canal com seção transversal retangular;
- canal com fundo plano e horizontal;
- fluido incompressível em escoamento permanente;
- distribuição uniforme de velocidades nas seções de entrada e saída;
- distribuição hidrostática de pressões nas seções de entrada e saída;
- forças de atrito e viscosas desprezíveis.

3.3.3. Altura do ressalto

A altura do ressalto hidráulico corresponde à elevação do nível d'água entre as alturas conjugadas y_1 e y_2 . Desta forma, basicamente, pode ser determinada a partir do conhecimento destes dois parâmetros de contorno, conforme indicado na Equação 8

$$y_j = y_2 - y_1 \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

y_j é a altura do ressalto hidráulico (m);

O parâmetro altura do ressalto é utilizado por alguns autores para a determinação, por exemplo, dos comprimentos característicos. Este fato pode ser observado e confirmado nos itens posteriores (CHOW, 1959).

3.3.4. Comprimentos característicos

Os comprimentos característicos, do ressalto completo e da zona de rolo, consistem em informações fundamentais e diretamente relacionadas ao dimensionamento das estruturas de dissipação em sistemas extravasores. Contudo, a determinação precisa e exata destas dimensões, a partir de abordagem analítica, é motivo de grande debate entre pesquisadores da área, em virtude da inexistência de consenso sobre a posição de término da zona de rolo e do ressalto hidráulico (TEIXEIRA, 2003).

Basicamente, o comprimento da zona de rolo (L_r) é medido desde a seção correspondente à altura conjugada rápida (y_1) até a seção onde termina a recirculação a partir dos vórtices de grande escala. Em contrapartida, embora possua a mesma seção inicial como referência, por óbvio, o comprimento total do ressalto (L_j) é medido até a seção correspondente à altura conjugada lenta (y_2). A representação esquemática dos comprimentos do rolo e do ressalto podem ser observados na Figura 13.

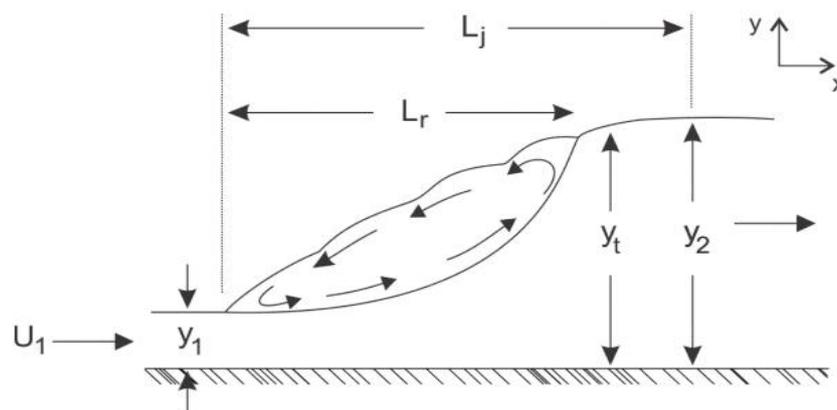


Figura 13. Esquemática do comprimento do ressalto (L_j), comprimento do rolo (L_r) e alturas conjugadas. Fonte: Nóbrega (2014) adaptado de Rajaratnam (1967)

Visando a determinação de uma metodologia para a determinação do comprimento do ressalto e baseado em dados, e recomendações, do USBR (1954), Chow (1959) elaborou o gráfico apresentado na Figura 14, relacionando

o comprimento de um ressalto, em canal horizontal e de seção retangular, com o número de Froude rápido (Fr_1) e a altura conjugada lenta (y_2). Ainda, no gráfico é possível analisar conjuntamente as classes do ressalto hidráulico, apresentadas e descritas anteriormente.

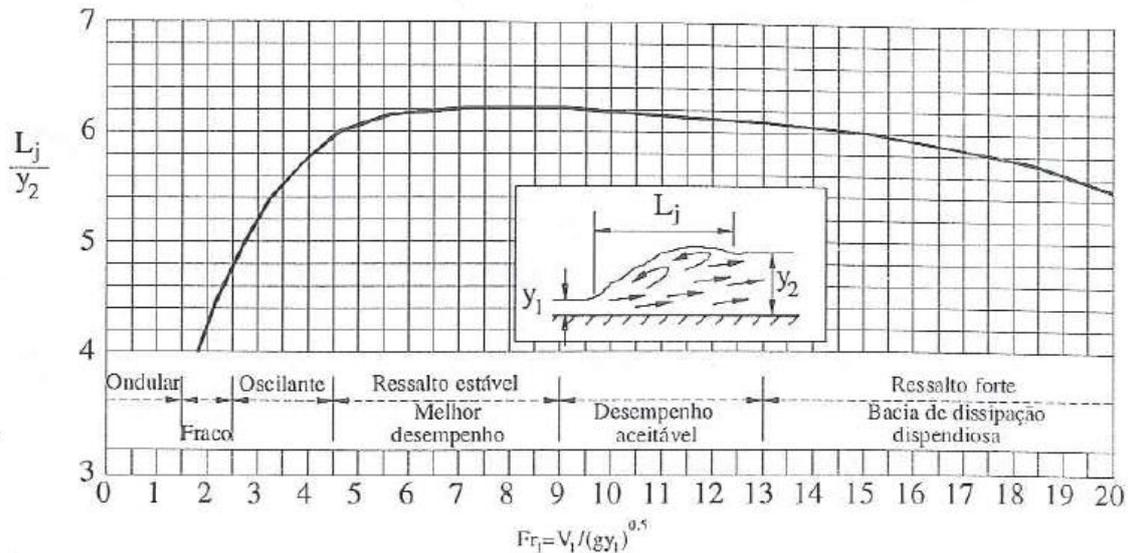


Figura 14. Comprimento do ressalto em função do número de Froude na seção de entrada e da profundidade conjugada lenta, juntamente da relação com as classes do fenômeno. Fonte: Porto (2006) adaptado de Chow (1959)

Além do USBR, diversos outros autores desenvolveram estudos e propostas de metodologias para a determinação do comprimento do ressalto hidráulico. Algumas das principais equações elaboradas, posteriormente, para esta finalidade encontram-se expressas a seguir, nas Equações 9, 10, 11 e 12.

$L_j = 6,1y_2, 4,5 \leq Fr_1 \leq 9$	9	(BRADLEY e PETERKA, 1957)
$L_j = 6,9(y_2 - y_1)$	10	(ELEVATORSKI, 1959)
$L_j = 8,5(y_2 - y_1)$	11	(MARQUES et al., 1997)
$L_j = 8,0(y_2 - y_1)$	12	(TEIXEIRA, 2003)

O comprimento do rolo do ressalto, também, possui difícil identificação, sendo motivo de discordância entre os pesquisadores. A partir dos estudos

desenvolvidos sobre o tema, Rajaratnam (1965) definiu o parâmetro sendo a distância entre a seção de entrada do ressalto e a seção onde a superfície livre atinge 95% da altura conjugada lenta. Posteriormente, a proposta do autor foi confirmada por Peterka (1984) e Lopardo (1986).

Assim como desenvolvido para o comprimento do ressalto, alguns autores elaboraram equações para a estimativa do comprimento do rolo. Segundo Teixeira (2003), as principais equações utilizadas para esta finalidade estão exibidas nas Equações 13 e 14.

$L_r = 4,5y_2, 4,5 \leq Fr_1 \leq 9$	13	(BRADLEY e PETERKA, 1957)
$L_r = 6,0(y_2 - y_1)$	14	(MARQUES et al., 1997)

3.3.5. Perfil superficial

Ao longo de um ressalto hidráulico, devido às intensas flutuações e turbulências ocorrentes, as profundidades a cada seção transversal, e por consequência a linha d'água superficial como um todo, variam significativamente no tempo. Embora esta possa ser uma informação valiosa para o projeto de bacias de dissipação e muros laterais, o perfil superficial não se trata de um parâmetro simples de ser obtido (CHOW, 1959).

Para o caso do ressalto clássico, formado em canal horizontal e retangular, alguns autores propuseram metodologias para a determinação de um perfil médio ao longo do tempo. Dentre estes, pode-se citar as clássicas curvas desenvolvidas por Bakhmeteff e Matzke (1936) apud Chow (1959) e a equação proposta por Hager (1993).

Os estudos elaborados por Bakhmeteff e Matzke (1936) apud Chow (1959) resultaram em diversas curvas adimensionais, relacionando o perfil superficial médio à altura do ressalto e ao número de Froude na entrada do mesmo. As curvas, desenvolvidas a partir de dados experimentais, podem ser observadas na Figura 15.

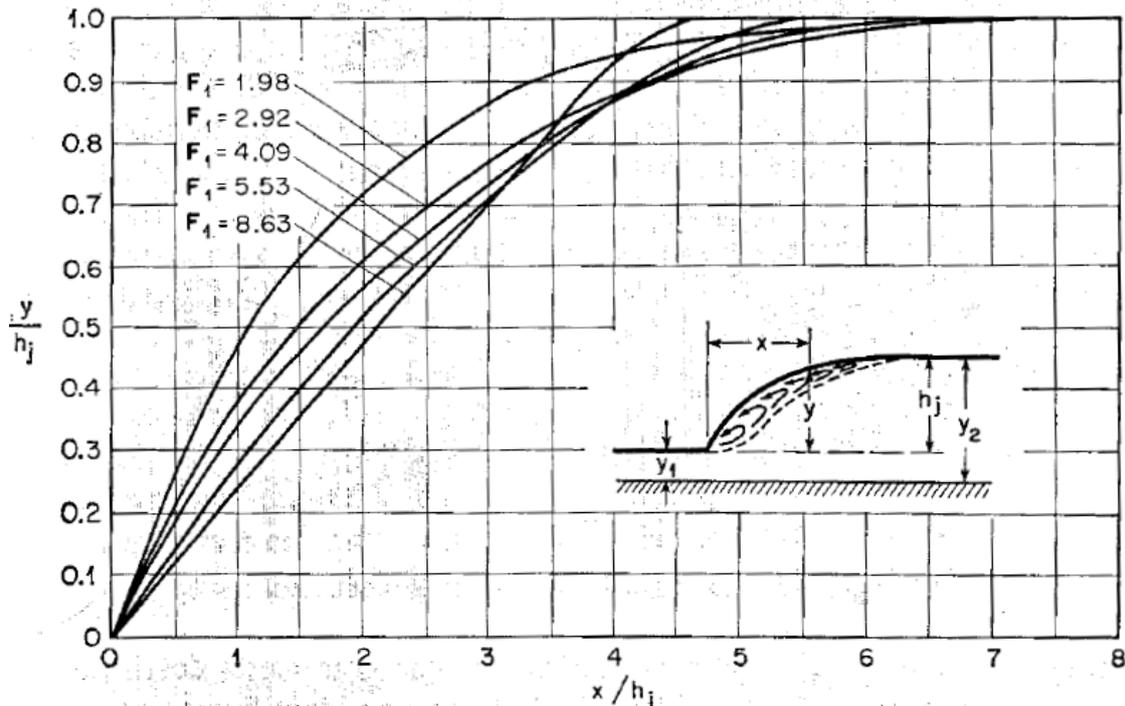


Figura 15. Perfil superficial médio, para ressaltos clássicos, em função do número de Froude rápido. Fonte: Bakhmeteff e Matzke (1936) apud Chow (1959)

Em contrapartida, Hager (1993), também fazendo uso de uma vasta quantidade de dados experimentais, desenvolveu uma equação válida para valores de Fr_1 entre 2 e 10. A Equação proposta pelo autor é exibida, a seguir, como Equação 15.

$$\frac{(y - y_1)}{(y_2 - y_1)} = \tanh\left(1,5 \cdot \frac{x}{L_r}\right) \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

x e y são o parâmetro de comprimento e altura de lâmina d'água, respectivamente, tendo como origem o ponto da superfície livre na seção de entrada do ressalto (m).

3.3.6. Perda de carga e Eficiência

Em um ressalto hidráulico, a perda de carga pode ser definida como a diferença entre a energia na seção de entrada e na seção de saída do ressalto, ou seja, entre as seções das alturas conjugadas. Supondo um canal horizontal de seção retangular e aplicando-se um balanço de energia, como realizado pela Equação de Bernoulli, por exemplo, torna-se possível obter a Equação 16 e

Equação 17 deduzidas com a finalidade de estimar a perda de carga (BAPTISTA E LARA, 2010).

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad \text{Equação 16}$$

$$\Delta H = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1y_2} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

ΔH é a perda de carga, ou energia, no ressalto hidráulico (m);

H_1 e H_2 são as cargas, ou energias, na seção de entrada e saída do ressalto, respectivamente (m).

A eficiência do ressalto hidráulico (η), comumente utilizada, também, como a eficiência da estrutura de dissipação, é definida como a razão entre o total de energia dissipada e a energia disponível na seção de entrada, conforme apresenta-se na Equação 18 (DAI PRÁ, 2011).

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \quad \text{Equação 18}$$

Objetivando-se ilustrar os parâmetros descritos neste, e em outros tópicos, a Figura 16 apresenta uma esquematização elaborada por Elevatorski (1959).

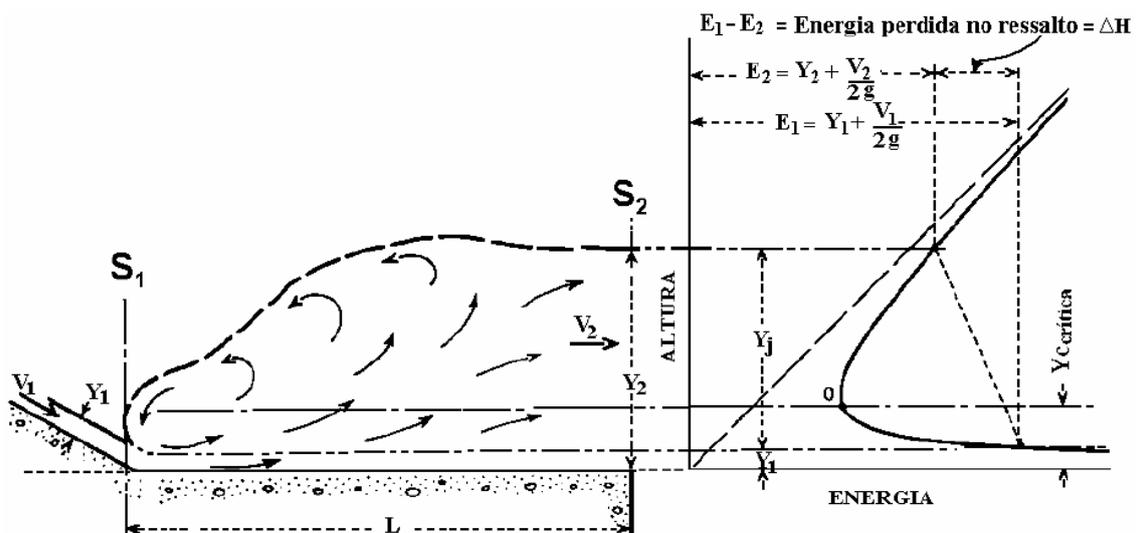


Figura 16. Esquematização da perda de carga no ressalto hidráulico, relacionando-a às alturas conjugadas. Fonte: Elevatorski (1959)

3.3.7. Localização do ressalto hidráulico

A localização do ressalto hidráulico trata-se de outro parâmetro de grande importância no dimensionamento de estruturas de dissipação. Conhecer, e controlar, este parâmetro pode reduzir consideravelmente a possibilidade de ocorrência de processos erosivos em locais desprotegidos (BAPTISTA E LARA, 2010).

Segundo Baptista e Lara (2010), para uma boa primeira aproximação da localização de um ressalto hidráulico, deve-se calcular duas linhas d'água, de montante e de jusante, a partir das profundidades conhecidas. Realizado este procedimento, entende-se que o ressalto fica definido pela interseção das curvas. Ainda, o autor salienta a importância em, simultaneamente, satisfazer as teorias de comprimento de ressalto e relações de alturas conjugadas.

Conforme, também, apresentado por Chow (1959), na prática, a localização do ressalto não tende a ser naturalmente fixa em uma posição. Esta afirmação justifica-se pela relação desta característica com a profundidade final do escoamento, a jusante do ressalto. A relação mencionada provém a existência de três casos distintos sobre a posição relativa de formação do fenômeno, sendo estas, ilustradas na Figura 17 e detalhadas a seguir.

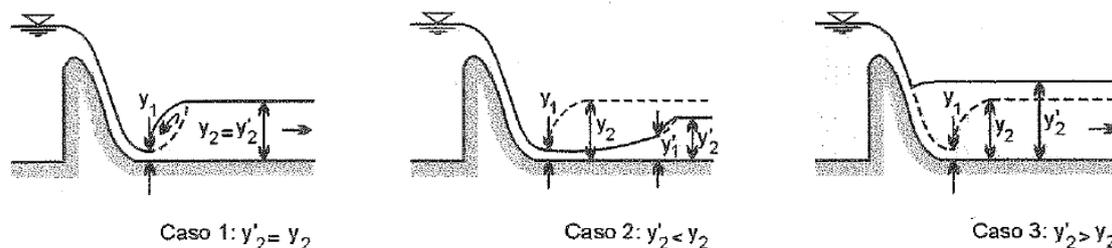


Figura 17. Localização de um ressalto, formado a jusante de um vertedouro, relacionada à altura conjugada lenta (y_2) e altura de lâmina d'água final do escoamento a jusante (y'_2). Fonte: Baptista e Lara (2010)

Caso 1) Este caso representa a situação na qual a profundidade final do fluxo (y'_2) é **igual** a profundidade conjugada lenta (y_2) do ressalto de projeto. Como pode ser observado na Figura 17, trata-se do ressalto clássico, formado completamente sobre o canal horizontal e iniciando-se imediatamente após a curva de concordância do vertedouro. Visando a proteção do canal contra processos erosivos, entende-se, este, como o caso ideal.

Caso 2) Este caso representa a situação na qual a profundidade final do fluxo real (y'_2) é **menor** que a profundidade conjugada lenta (y_2) de projeto. Neste caso, o ressalto possui tendência a deslocar-se para jusante. Com relação à eficiência na proteção de um canal contra a erosão, sempre que possível, este caso deve ser evitado, em virtude da possibilidade do ressalto se transladar até regiões desprotegidas e causar danos estruturais severos.

Caso 3) Este caso representa a situação na qual a profundidade final do fluxo real (y'_2) é **maior** que a profundidade conjugada lenta de projeto (y_2). Neste caso, o fenômeno possui tendência a deslocar-se para montante, dando origem a um ressalto afogado. Certamente, pode-se afirmar que este caso garante maior segurança quanto à processos erosivos no canal, em razão de deslocar o ressalto para regiões mais protegidas. Contudo, também, diversos autores afirmam tratar-se do caso menos eficiente quanto à dissipação de energia (CHOW, 1959).

Uma abordagem complementar utilizada para a determinação da posição do ressalto hidráulico envolve as definições de força específica. Conforme, também, apresentado por Baptista e Lara (2010), as forças específicas nas seções de início e final do ressalto hidráulico, sempre, encontram-se em igualdade. Desta forma, pode-se afirmar que em situações de deslocamento do ressalto, para montante ou jusante, o equilíbrio entre as forças específicas é a condição final.

Ainda, cabe destacar-se que, na prática, tanto na natureza como em estruturas artificiais, é comum haver variação na profundidade final do fluxo, gerando tendências de deslocamentos do ressalto hidráulico. A partir disso, no projeto de bacias de dissipação, é bastante usual a implementação de estruturas complementares, as quais auxiliam a manter a formação do fenômeno dentro do local revestido e reforçado contra erosões. Em tópicos anteriores, as estruturas supracitadas foram melhor apresentadas e definidas.

3.3.8. Ressalto em canais inclinados

Na análise do ressalto hidráulico em canais inclinados, diferentemente do que ocorre em canais horizontais, deve-se considerar as forças geradas pela

gravidade. Em canais horizontais, como na maioria dos casos apresentados até aqui, estas forças podem ser dadas como insignificantes (CHOW, 1959).

Kindsvater (1944) apud Hager (1992), estabeleceu a partir de seus estudos, uma das mais tradicionais classificações para ressaltos em calhas inclinadas, levando em consideração a sua posição de ocorrência. Na Figura 18 encontram-se representadas os 5 tipos de ressalto propostos pelo autor, descritas na sequência.

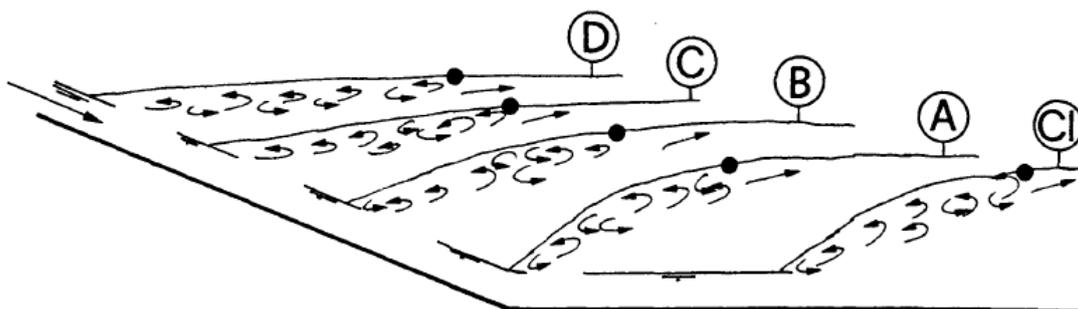


Figura 18. Tipos de ressalto em canais inclinados. Fonte: Hager (1992)

CL) Ressalto clássico, formado completamente no plano horizontal, com influência reduzida do plano inclinado de montante. É classificado como um ressalto livre.

A) O ressalto tipo A é formado imediatamente a jusante do canal inclinado, no início do plano horizontal. Neste tipo de ressalto, o fenômeno ocorre por completo sobre o canal horizontal, tratando-se, também, de um ressalto livre, porém, com maior influência do trecho inclinado.

B) O ressalto tipo B consiste em um dos ressaltos classificados como afogado, tendo início de formação ainda no canal inclinado. A posição final de um ressalto deste tipo dá-se sobre o plano horizontal.

C) O ressalto do tipo C trata-se, também, de um ressalto afogado. A formação de um ressalto deste tipo ocorre sobre o plano inclinado, contudo, diferenciando-se dos ressaltos do tipo B, o final do fenômeno ocorre sobre a tangência entre os planos inclinado e horizontal.

D) O ressalto do tipo D, como os dois tipos anteriores, é um ressalto afogado. Entretanto, neste tipo de ressalto, a formação ocorre completamente sobre o canal inclinado (HAGER, 1992).

Devido às suas características distintas com relação a ressaltos formados em canais horizontais, a aplicação das metodologias desenvolvidas para um ressalto clássico não é recomendada para ressaltos em canais inclinados. Diante deste fato, diversos autores elaboraram estudos e metodologias específicas para canais inclinados, visando a determinação dos principais parâmetros de caracterização.

A seguir, na Figura 19 , exibe-se um gráfico capaz de fornecer a relação entre as alturas conjugadas a partir da declividade do canal e do número de Froude na entrada do ressalto. O gráfico, apresentado por Chow (1959), foi baseado em dados experimentais de Hickox, Kindsvater, Bakhmeteff y Matzke e USBR.

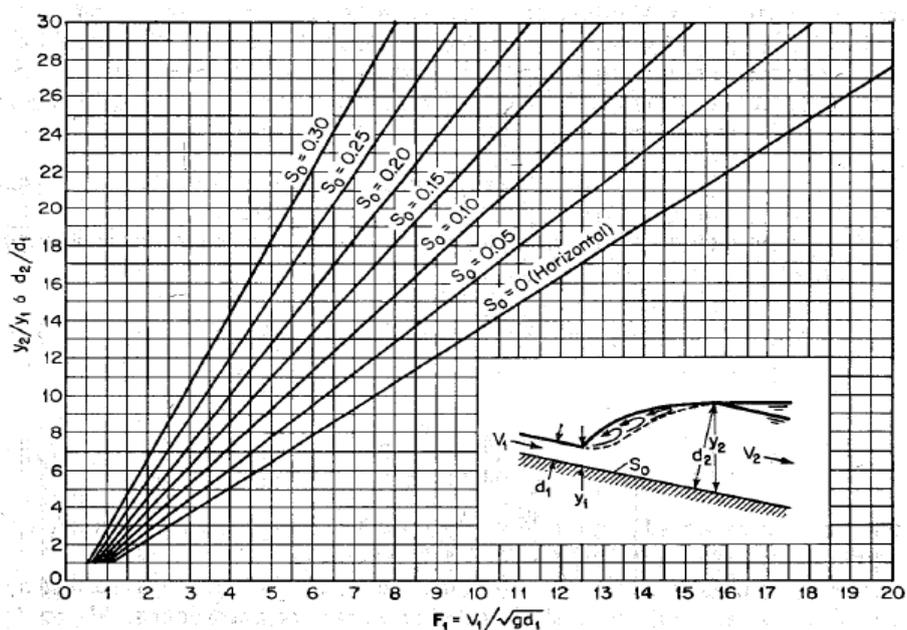


Figura 19. Relação adimensional entre as alturas conjugadas, número de Froude no início do ressalto e a declividade do canal. Fonte: Chow (1959)

A Figura 20, por outro lado, a partir dos mesmos parâmetros mencionados na figura anterior, possibilita a estimativa do comprimento do ressalto hidráulico em canais de diferentes declividades (CHOW, 1959).

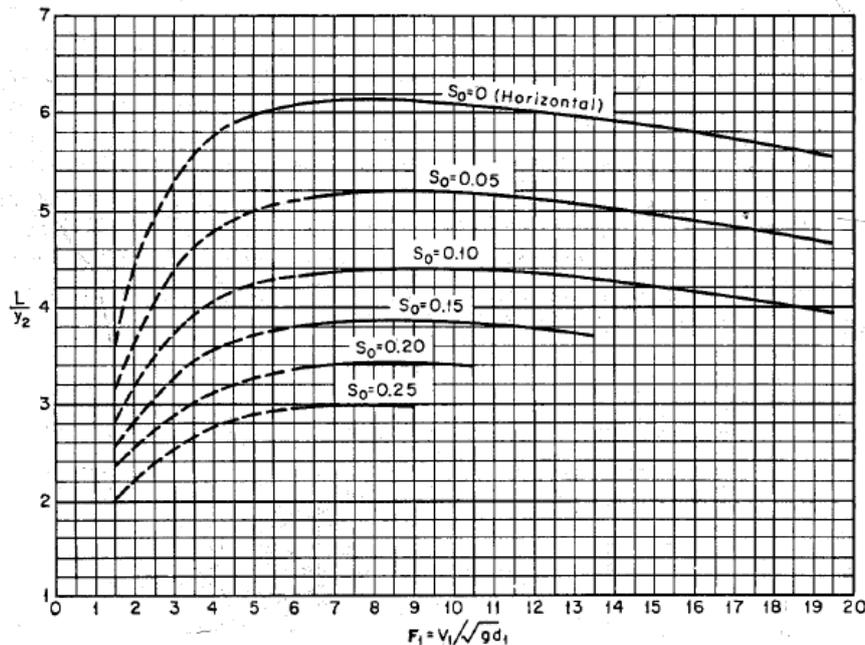


Figura 20. Relação adimensional entre o comprimento do ressalto, o número de Froude rápido e a declividade do canal. Fonte: USBR (1955) apud Chow (1959)

3.4. ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS - PRESSÕES

O escoamento que se desenvolve em sistemas extravasores de barragens, frequentemente, impõe às estruturas constituintes, um regime de esforços intenso. Uma das principais grandezas utilizadas no estudo desses esforços é a pressão ao longo da superfície das estruturas.

Em bacias de dissipação por ressalto hidráulico, por exemplo, pode-se afirmar que o fenômeno está diretamente relacionado ao regime de pressões e, conseqüentemente, ao regime de esforços sobre a laje de concreto. Desta forma, segundo Steinke Júnior (2020), há grande interesse no meio científico e na engenharia hidráulica estrutural, pelo avanço nos conhecimentos sobre essas características internas do ressalto, visto que o tema não se encontra, ainda, tão desenvolvido quanto os estudos sobre as características externas.

Comumente, nos estudos associados às pressões, os dados são avaliados a partir de análises estatísticas. Nestas, partindo de séries de pressões instantâneas, pode-se determinar valores característicos de pressões médias, extremas (mínimas e máximas) e flutuações de pressão. Com relação ao ressalto hidráulico, por exemplo, Toso e Bowers (1988) indicam que as análises estatísticas podem caracterizar bem as pressões desenvolvidas no fenômeno,

assumindo-se serem regidas por alguma distribuição de probabilidade conhecida, devido à sua propriedade ergódica, estacionária e aleatória.

A seguir, são apresentados alguns dados e parâmetros desenvolvidos por diversos pesquisadores sobre este tema. As informações foram organizadas em subtópicos relacionados com pressões médias, extremas e flutuações de pressão. Salienta-se, aqui, que os trabalhos destacados sobre as pressões provenientes do ressalto hidráulico foram fruto de estudos em bacias de dissipação com fundo plano e horizontal.

3.4.1. Pressões médias

As pressões médias sobre uma soleira de perfil WES, com vazão regulada por comporta radial e paramento de montante vertical, foi razão de estudo de Lemos (1975; 1981). Fazendo uso de um modelo reduzido, o autor realizou pesquisas experimentais para analisar o comportamento das pressões, ao longo do perfil da soleira, para diferentes cargas, posição do ponto de batente e posição do eixo de rotação da comporta radial. Este estudo teve como principal interesse a compreensão e, possível, minimização das pressões negativas na soleira, a jusante de comportas.

A esquematização dos parâmetros utilizados por Lemos (1975; 1981) e os resultados de pressão média, adimensionalizados, para duas posições distintas do ponto de batente da comporta, são exibidos a seguir, nas Figura 21, Figura 22 e Figura 23.

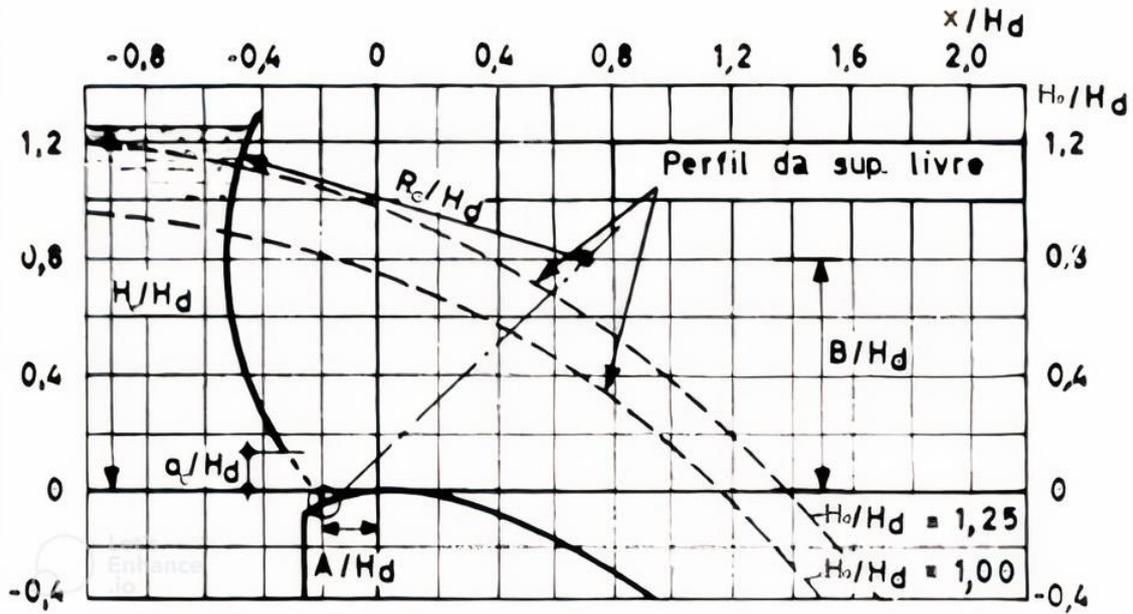


Figura 21. Esquematização dos parâmetros adimensionais. Fonte: Lemos (1975)

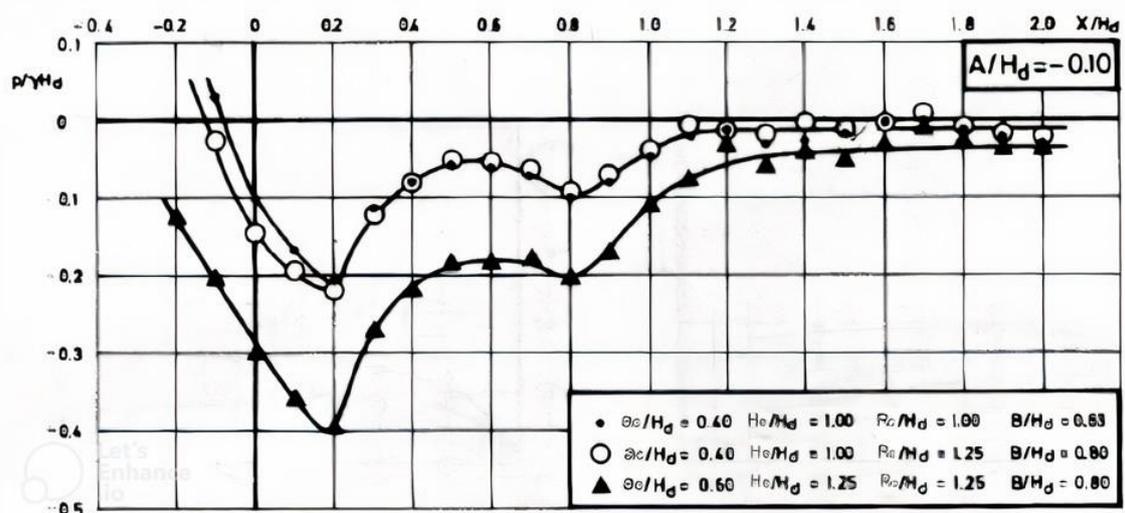


Figura 22. Distribuição de pressões médias ao longo do perfil do vertedouro, para a posição do batente $A/H_d = -0,1$. Fonte: Lemos (1981)

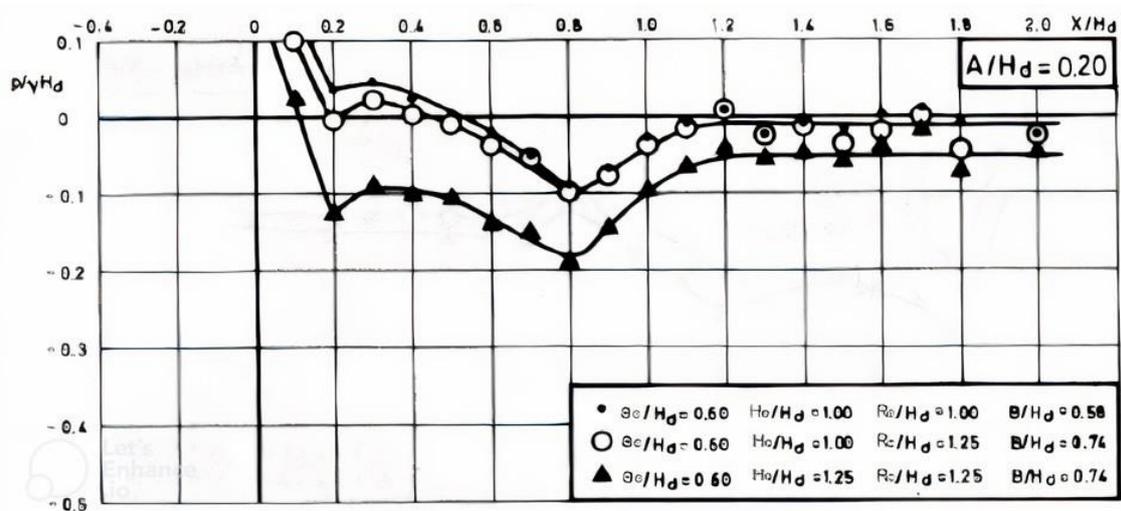


Figura 23. Distribuição de pressões médias ao longo do perfil do vertedouro, para a posição do batente $A/H_d = 0,2$. Fonte: Lemos (1981)

Sobre as pressões médias oriundas de um ressalto hidráulico formado sobre bacia de dissipação plana e horizontal, Marques et al. (1997) propõem uma relação adimensional para caracterizá-la. A proposta é sugerida em virtude da distribuição de pressões, ao longo do ressalto, não obedecer a uma distribuição normal. Os parâmetros adimensionais propostos pelos autores para a pressão média e para a posição longitudinal ao longo do ressalto são exibidos na Equação 19

$$\frac{(P_{xr} - y_1)}{(y_2 - y_1)} = f\left(\frac{X_r}{y_2 - y_1}\right) \quad \text{Equação 19}$$

Onde:

P_{xr} é a pressão média em um ponto distante X unidades do início do ressalto hidráulico (m.c.a.);

X_r é distância horizontal a partir do início do ressalto hidráulico (m).

Os dados de pressão média obtidos por Marques et al. (1997) foram plotados, a partir da utilização do adimensional apresentado, com os dados de Endres (1990), Marques (1995) e Pinheiro (1995), apresentando ótima correspondência. O gráfico com os dados supracitados encontra-se na Figura 24. Nota-se que nas proximidades do final do ressalto, ocorre a aproximação dos valores de pressão média à uma constante.

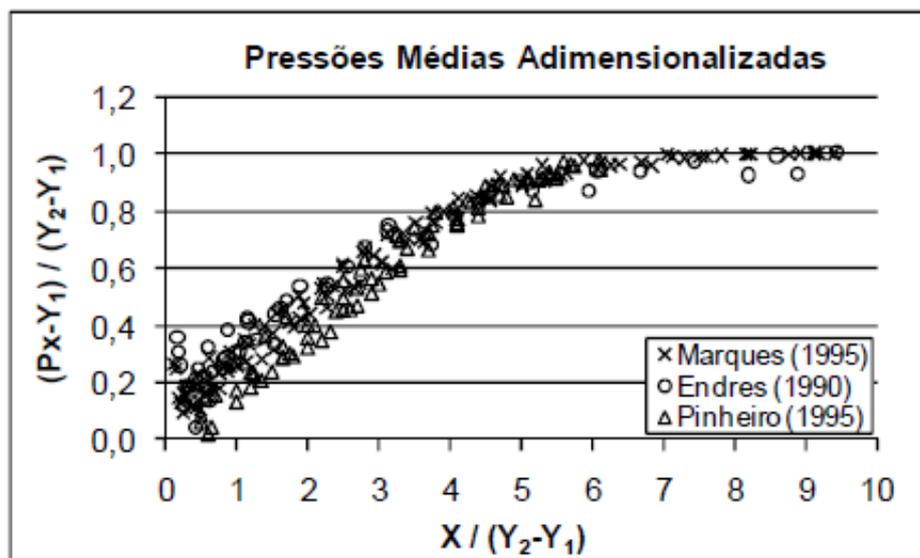


Figura 24. Pressões médias adimensionalizadas. Fonte: Marques et al. (1997)

Posteriormente, Dai Prá (2011) avaliou as pressões do ressalto hidráulico a partir de uma abordagem de efeitos individuais e sobrepostos. Partindo de diferentes condições de escoamento, entre outros efeitos, o autor analisou a influência da curva de concordância entre o perfil do vertedouro e a bacia de dissipação e o grau de afogamento do ressalto. Com relação às pressões médias, a proposta de efeitos individuais e sobrepostos encontra-se na Figura 25.

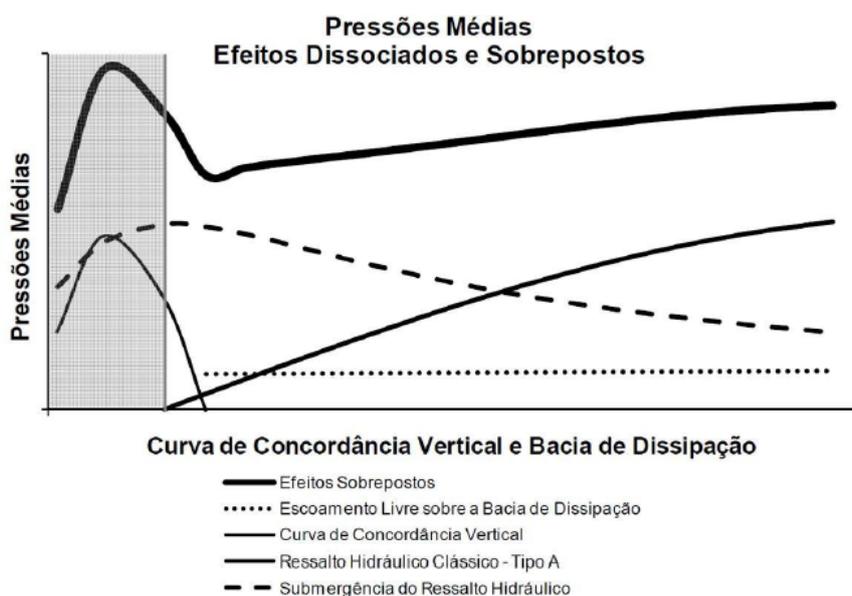


Figura 25. Dissociação e sobreposição de efeitos sobre a pressão média. Fonte: Dai Prá (2011)

4. METODOLOGIA

Neste tópico serão apresentados todos os materiais, procedimentos e análises utilizadas para a obtenção dos resultados e cumprimento dos objetivos propostos. Assim, visando a melhor compreensão dos leitores, as informações estão distribuídas nos subtópicos: instalação experimental, aquisição de dados (ensaios) e análise dos dados.

Ressalta-se que a participação efetiva do autor do presente trabalho se deu na análise dos dados, não estando, este, envolvido na instalação experimental e na aquisição dos dados, durante a realização dos ensaios. Os dados geradores desta pesquisa foram disponibilizados, por FURNAS, a partir do Relatório DSB.E.173.2022-R0 - P&D Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas – Ensaios em modelo reduzido parcial do vertedouro da UHE Foz do Chapecó, desenvolvido pelo Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia na Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica.

O projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas é um projeto de P&D (pesquisa e desenvolvimento) ANEEL, firmado entre a Eletrobrás - Furnas, Foz do Chapecó Energia S.A. e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Pesquisas Hidráulicas.

4.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a obtenção dos dados de pressão média analisados neste trabalho foi utilizado um modelo físico reduzido bidimensional. O modelo em questão é composto por um vertedouro controlado por comportas e uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico inclinada.

As estruturas modeladas representam parte do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó (Figura 26). A usina, localizada no rio Uruguai entre os municípios de Águas de Chapecó – SC e Alpestre – RS, é administrada e operada pela Foz do Chapecó Energia S.A. Por sua vez, a instalação do modelo físico reduzido e, conseqüentemente, a realização dos ensaios, foram executadas no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas (LAHE), no Rio de Janeiro – RJ.



Figura 26. UHE Foz do Chapecó. Fonte: Júnior. Acesso em: 10/04/2023.

Tratando-se de uma modelagem de escoamento a superfície livre, a condição de semelhança adotada, entre modelo e protótipo, foi o número de Froude (Equação 5). Essa condição é comumente utilizada nesse tipo de modelagem, onde o escoamento é regido, principalmente, por forças inerciais e gravitacionais.

Em protótipo (Figura 26), o vertedouro da UHE Foz do Chapecó apresenta uma largura total de 343,5 metros, totalizando 15 vãos e 14 pilares. Em contrapartida, o modelo parcial foi projetado em uma escala de redução de 1:40, sendo composto por 1 vão central e duas metades de vão, uma em cada lateral. O propósito desta configuração de vãos consiste na simulação de um vão central em protótipo, extinguindo os efeitos das paredes laterais do canal, onde o modelo se encontra, a partir do escoamento proveniente dos $\frac{1}{2}$ vãos.

A bacia de dissipação foi reduzida, e modelada, a partir da mesma escala utilizada no vertedouro. A estrutura em análise consiste em uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico inclinada, em declive. Na Figura 27 são apresentadas imagens do modelo físico reduzido em condições de ensaio.

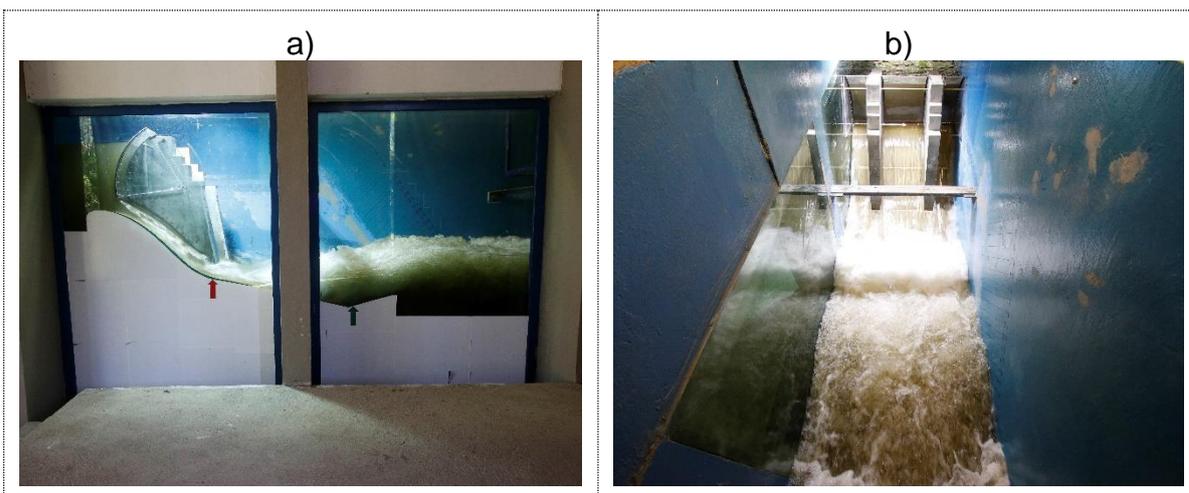


Figura 27. Modelo físico parcial reduzido do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó em vista de perfil (a) e de jusante para montante (b).

As principais características geométricas do modelo parcial reduzido e do protótipo do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó encontram-se contempladas, a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1. Principais características geométricas do modelo reduzido parcial e do protótipo.

Vertedouro		
Parâmetro	Modelo	Protótipo
Escala	1:40	-
Altura total (m)	0,86	34,4
Largura total (m)	1,16	343,5
Largura efetiva (m)	0,94	280,5
Largura do vão (m)	0,47	18,7
Número de vãos	$\frac{1}{2} + 1 + \frac{1}{2}$	15
Raio da comporta (m)	0,5	20
Tipo de comporta	Segmento	
Largura do pilar (m)	0,11	4,5
Altura do pilar (m)	0,59	23,6
Forma do pilar	Hidrodinâmico	
Declividade máxima (m/m)	-0,98	
Comprimento horizontal (m)	1,01	40,23
Raio de concordância (m)	0,53	21
Bacia de Dissipação		
Parâmetro	Modelo	Protótipo
Escala	1:40	-
Declividade (m/m)	-0,22	
Largura (m)	1,16	343,5
Comprimento horizontal (m)	1,43	57,37
Altura soleira terminal (m)	0,10	3,88
Inclinação soleira terminal (m/m)	0,29	

No LAHE, o modelo reduzido parcial foi instalado em um canal hidráulico preexistente, composto, em um dos lados, por placas de vidro. O canal é responsável pela condução da vazão até o modelo e pelo trecho a jusante, sendo componente de um sistema hidráulico fechado. Desta forma, durante os ensaios, a água era bombeada, partindo do reservatório de abastecimento do sistema, conduzida através do canal e, conseqüentemente, do modelo e, posteriormente, retornando ao mesmo reservatório.

Quanto aos materiais de construção do sistema, o canal hidráulico e o modelo reduzido parcial foram construídos em concreto, sendo instalada uma comporta metálica para o controle da vazão vertida. Entretanto, com relação ao canal, como pode ser visualizado na Figura 28 (a), há trechos em que foram inseridas placas de acrílico na parede direita, com o propósito da realização de registros fotográficos e visualização em perfil, do modelo e do escoamento, durante os ensaios.

Auxiliando na visualização de parte das estruturas mencionadas e descritas, na Figura 28 encontram-se expostas duas esquematizações, em perfil, do sistema estudado, inserido no canal de alimentação (a) e em maior detalhamento (b). As cotas apresentadas correspondem à escala de protótipo.

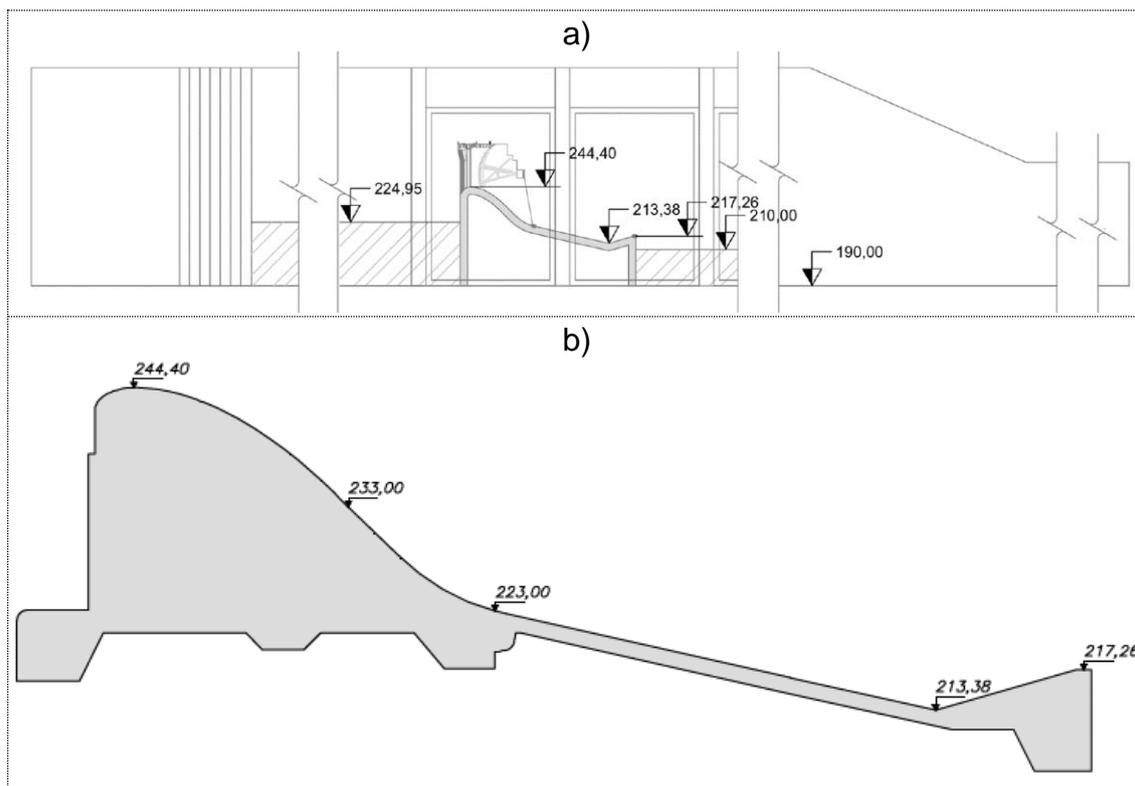


Figura 28. Esquemática, em perfil e escala de protótipo, das estruturas estudadas, inseridas no canal de alimentação (a) e em maior detalhamento do sistema extravasor (b). Fontes: FURNAS (a) e Autor (b).

4.2 AQUISIÇÃO DE DADOS - ENSAIOS

Os dados adquiridos para as análises foram provenientes de diferentes ensaios no modelo físico reduzido. Ao longo dos ensaios foram controlados três parâmetros principais: a vazão, o nível de água a montante do vertedouro e o nível a jusante da estrutura.

A combinação de variação entre vazão e o nível a jusante resultou em um total de 16 ensaios, conforme apresentado na Tabela 2. As vazões foram estabelecidas a partir da capacidade máxima de bombeamento do LAHE. Em contrapartida, os níveis de jusante ensaiados foram relacionados ao nível de água operacional, obtido a partir de curva-chave. Desta forma, se estabeleceu o grau de afogamento do ressalto hidráulico (S), sendo considerado igual a 1 na condição operacional do sistema extravasor. Além da condição operacional, foram ensaiadas: uma condição sem controle do nível de jusante e sem formação de ressalto hidráulico sobre a bacia de dissipação (escoamento livre), uma condição com 20% de afogamento sobre a condição operacional ($S = 1,2$) e uma condição com 40% de afogamento sobre a condição operacional ($S = 1,4$).

Ao longo dos ensaios, objetivou-se manter o nível de água no reservatório próximo da cota operacional (265,00 m), visando fidelizar os ensaios frente às condições de operação em protótipo.

Tabela 2. Condições propostas e aplicadas para cada ensaio.

Q Protótipo (m³/s)	Q Modelo (L/s)	NA RES (m)	Ab (m)	NA JUS (m)	S
5519	72,70	264,43	1,59	-	-
		264,74		227,29	1,0
		264,95		229,34	1,2
		264,78		231,4	1,4
9732	128,20	264,31	2,9	-	-
		264,99		229,18	1,0
		264,96		231,65	1,2
		264,86		233,92	1,4
17291	227,80	264,87	5,36	-	-
		264,77		231,93	1,0
		264,75		234,74	1,2
		264,83		237,52	1,4
29876	393,70	264,47	9,5	-	-
		264,55		235,59	1,0
		264,63		238,92	1,2
		264,63		242,25	1,4

*Q Protótipo = Vazão em protótipo; Q Modelo = Vazão no modelo; NA JUS = Nível de água a jusante; S = Grau de afogamento do ressalto com relação à condição operacional; Ab = Abertura da comporta; NA RES = Nível de água no reservatório (montante).

Durante os ensaios foram coletados dados de pressão (médias e flutuantes) e lâmina d'água média ao longo de 16 tomadas de medição preestabelecidas. A posição das tomadas de medição, em escala de protótipo, pode ser visualizada na Figura 29 e localizadas a partir das distâncias exibidas na Tabela 3, medidas a partir da crista do vertedouro. Salienta-se que, embora coletadas, as informações de pressões instantâneas/flutuantes não fizeram parte do escopo de análise deste trabalho.

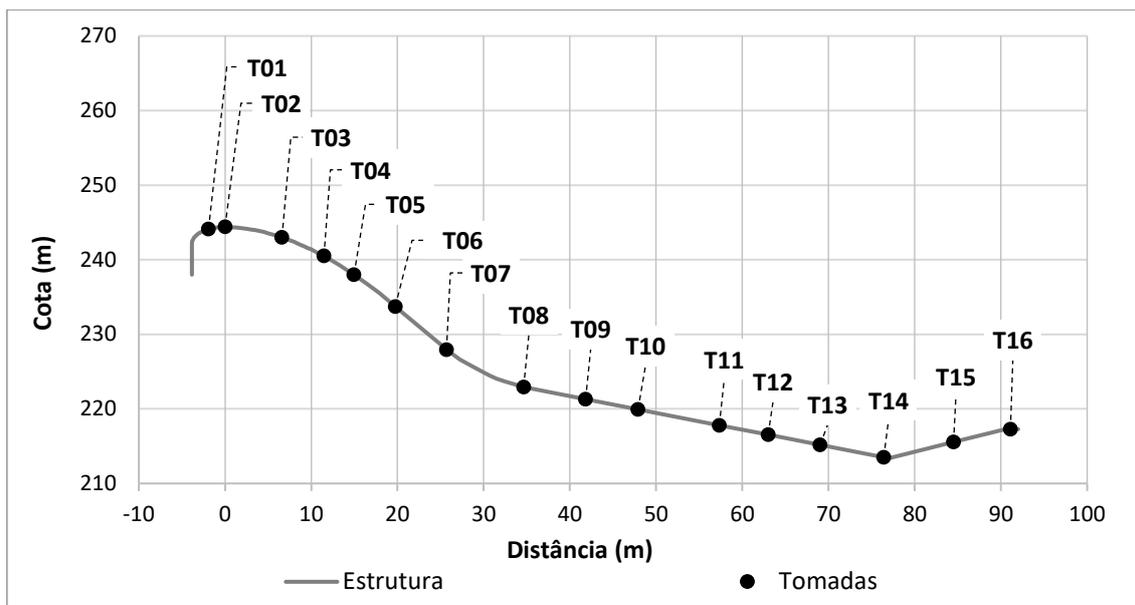


Figura 29. Esquematização da posição das tomadas de medição.

Tabela 3. Distâncias das tomadas de pressão e lâmina d'água média, medidas a partir da crista do vertedouro.

Tomada	Distâncias (m)	
	Horizontal	Vertical
T01	-1,92	-0,30
T02*	0,00	0,00
T03	6,60	-1,41
T04	11,47	-3,92
T05	14,96	-6,40
T06	19,74	-10,67
T07	25,68	-16,46
T08	34,63	-21,47
T09	41,82	-23,11
T10	47,90	-24,48
T11	57,33	-26,60
T12	62,99	-27,87
T13	69,03	-29,23
T14	76,40	-30,89
T15	84,50	-28,86
T16	91,10	-27,14

*Tomada localizada na crista do vertedouro.

As vazões ensaiadas foram controladas a partir de um inversor de frequência, acoplado ao sistema de bombeamento, e monitoradas por dois medidores, instalados nas tubulações do circuito hidráulico. O detalhamento das

principais características dos medidores de vazão utilizados é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Informações dos medidores de vazão utilizados.

Diâmetro Nominal (mm)	Fabricante	Modelo	Faixa de operação (L/s)	Precisão de medição (%)
150	MafeTech Ind	MAFEMF1000	5,7 a 170	0,5
400	Emerson - Rosemount	8705	35 a 1042	0,25

Os níveis de água de montante (reservatório) e jusante foram medidos a partir de pontas linimétricas fixas, instaladas na lateral do canal hidráulico no qual o modelo foi inserido. As pontas linimétricas, com precisão de medição de 0,1 mm, se encontravam fixadas, em escala de protótipo, a 215 e 285 m, em relação à crista do vertedouro (montante) e o fim da soleira terminal (jusante), respectivamente. O controle dos níveis de água a jusante, e conseqüentemente do grau de afogamento do ressalto, foi estabelecido a partir da utilização de uma comporta basculante, fixada a 385 m, em escala de protótipo, da posição de medição da lâmina d'água. Cabe salientar que para as condições de ensaio com escoamento livre, independentemente da vazão, não houve medição do nível de jusante, nem operação da comporta basculante.

As lâminas d'água médias ao longo do sistema extravasor, medidas nas tomadas apresentadas na Figura 29, foram obtidas, também, com o uso de pontas linimétricas, contudo, estas, móveis. O dado foi coletado uma vez em cada tomada, durante os quatro ensaios com escoamento livre. O registro das leituras foi armazenado, diretamente, em planilha eletrônica.

Quanto aos dados de pressão média, estes foram obtidos com a utilização de tubos piezométricos, fornecendo uma precisão de 1 mm nas medições. O local de instalação dos piezômetros coincidiu com as posições de leitura da lâmina d'água (Figura 29), sendo conectados, ao modelo, sob a linha longitudinal central do canal.

4.3 ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente, devido às particularidades geométricas do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, abordagens tradicionais, por exemplo, utilizando as

metodologias clássicas e plenamente estabelecidas para bacias de dissipação horizontais e/ou para determinação da lâmina d'água média, foram descartadas. De forma geral, as metodologias apresentadas em itens anteriores não apresentaram resultados satisfatórios para a estrutura em estudo.

Assim, a metodologia proposta, objetivo principal desse trabalho, envolveu a determinação de equacionamentos que possibilitem estimar as pressões médias no sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó. Em relação à lâmina d'água média, um dos parâmetros mais importantes no estudo de escoamentos à superfície livre, também fez-se necessária a determinação de equações de estimativa. Os métodos empregados na análise dos dados de lâmina d'água média e pressões médias encontram-se apresentados nos subtópicos seguintes.

Cabe salientar que, na análise referente a ambos os parâmetros, o processamento dos dados deu-se a partir da busca pelo melhor agrupamento possível dos dados. Para atingir esse objetivo, frequentemente dividiu-se o sistema extravasor em trechos menores, que compartilham características comportamentais e/ou parâmetros hidráulicos de influência. Neste caso, durante a realização dos ajustes por trechos, tomou-se o cuidado de sobrepor as tomadas de delimitação, com a finalidade de que a metodologia final tenha validade para toda a estrutura.

Sempre que necessário, também, foram utilizadas relações adimensionais envolvendo o dado em questão e outros parâmetros hidráulicos de fácil obtenção, seja por cálculo, medição ou consulta em plantas e perfis da estrutura. A escolha dos parâmetros hidráulicos utilizados nas adimensionalizações teve como meta facilitar a posterior aplicação da metodologia proposta neste estudo, tornando-a mais acessível e prática.

Ainda, destaca-se que as tomadas de pressão T01, T02 e T16, conforme Figura 29, foram descartadas da análise de dados e, conseqüentemente, da metodologia proposta para estimativa final das pressões médias. Isso se deve ao fato de localizarem-se a montante do batente da comporta (T01 e T02) e sobre o topo da soleira terminal (T16), regiões de menor interesse para o estudo.

4.3.1. Lâmina d'água média

Em escoamentos à superfície livre, conforme mencionado, a lâmina de água, ou profundidade, é um parâmetro de grande importância, possuindo relação estrita com a vazão e pressões ocorrentes, de forma que seu conhecimento é fundamental para a caracterização do escoamento. Desta forma, parte dos procedimentos de análise aplicados visou o estabelecimento de equações capazes de estimar este parâmetro ao longo da estrutura.

Inicialmente, os dados de lâmina d'água média, provenientes das medições com ponta linimétrica durante os ensaios com escoamento livre, foram plotados em gráficos, com o uso do software Excel. A partir do procedimento, visou-se a compreensão inicial do desenvolvimento desse parâmetro ao longo do sistema extravasor e a busca de tendências comportamentais dos dados.

Após, conforme indicado nos resultados experimentais, optou-se pela divisão longitudinal do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó em dois trechos distintos (Figura 30). A seguir, encontram-se as informações sobre as delimitações de cada trecho, bem como as abordagens analíticas empregadas para a determinação dos equacionamentos expostos nos resultados.

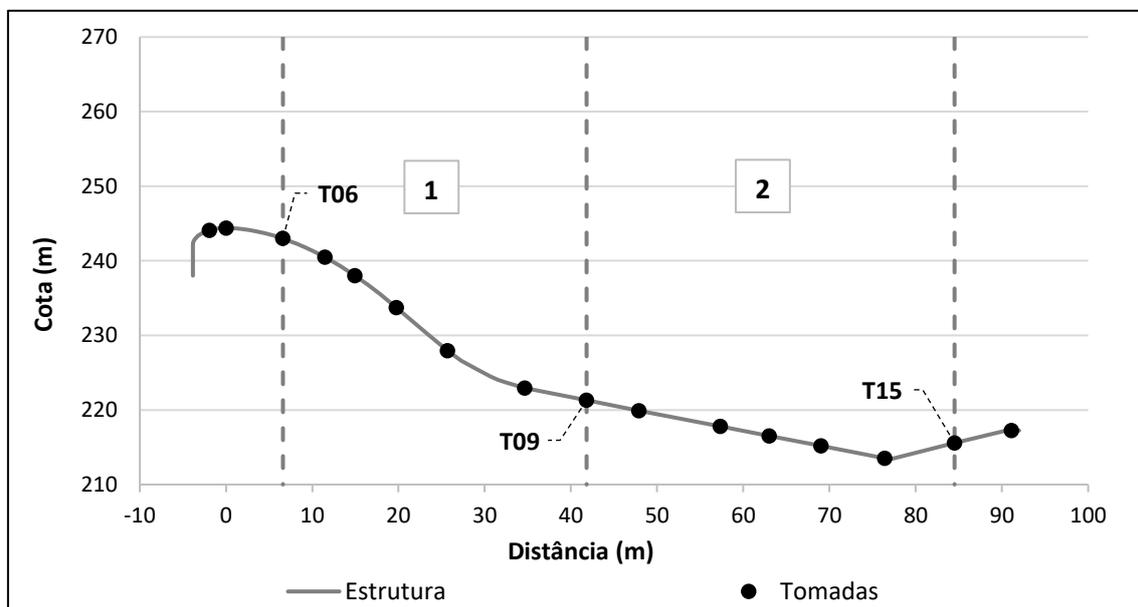


Figura 30. Divisão, do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, adotada para a análise da lâmina d'água média, em condição de escoamento livre.

4.3.1.1 Trecho 1

O primeiro trecho de análise da lâmina de água média, conforme ilustrado na Figura 30, compreende o segmento estrutural com início e final nas tomadas T03 e T09, respectivamente. Desta forma, o trecho inclui parte da soleira Creager, a curva de concordância vertical entre a soleira e a bacia em declive e o início da estrutura de dissipação.

Neste trecho, aplicou-se uma adimensionalização aos valores médios da lâmina d'água. O procedimento foi utilizado com a finalidade de agrupar os dados das diferentes vazões ensaiadas em um único equacionamento, válido para o trecho em questão. Para este caso, adimensionalizou-se a lâmina d'água média pela abertura de comporta (Tabela 2), aplicada para cada vazão, em função da distância horizontal medida a partir da crista do vertedouro. Entende-se que a abertura de comporta se trata de um parâmetro relacionado com a vazão e com importante influência no início do sistema extravasor, onde está situado o trecho 1, principalmente pelo fato de que as comportas foram operadas de maneira a manter o nível no reservatório idêntico para todas as vazões. A relação obtida, apresentada posteriormente nos resultados, segue a forma exibida na Equação 20.

$$\frac{h_{méd}}{Ab} = f(X) \quad \text{Equação 20}$$

Onde:

$h_{méd}$ é a lâmina de água média na posição horizontal X (m);

Ab é a abertura de comporta utilizada nos ensaios, conforme apresentado na Tabela 2 (m);

X é a distância horizontal do ponto de interesse, medida a partir da crista do vertedouro (m).

4.3.1.2 Trecho 2

O segundo trecho de análise da lâmina de água média tem início e final nas tomadas T09 e T15 (Figura 30). Assim, o trecho compreende quase a totalidade da bacia de dissipação inclinada, com exceção do trecho inicial, até a tomada T09.

Para este trecho optou-se por adotar um valor constante de lâmina d'água média, associando-a apenas à vazão escoada, mas não à posição ao longo do trecho. Posteriormente, a partir da observação dos resultados experimentais, pode-se compreender melhor a decisão tomada, em virtude de, neste trecho, os valores de lâmina d'água média apresentarem-se relativamente constantes, especialmente para as menores vazões.

A relação estabelecida para a determinação da lâmina de água média no trecho 2 envolveu a utilização da altura normal do escoamento para o trecho em declive da bacia de dissipação, como parâmetro diretamente relacionado à vazão. Na Equação 21 é apresentada a forma de relação estabelecida para este trecho.

$$h_{méd} = f(h_n) \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

$h_{méd}$ é a lâmina de água média no trecho 2 (m);

h_n é a altura normal do escoamento (m).

A altura normal do escoamento, utilizada na relação exibida, é determinada, para cada vazão, a partir da equação de Manning (Equação 22). Salienta-se que nas aplicações da equação de Manning, realizadas neste estudo, utilizou-se um valor de coeficiente de rugosidade (n) igual a $0,018 \text{ s.m}^{-1/3}$, sendo este, um valor usual para superfícies em concreto.

$$Q = \frac{A R_H^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

Q é a vazão volumétrica (m^3/s);

A é a área molhada (m^2);

R_H é o raio hidráulico (m);

I é a declividade do fundo do canal (m/m);

n é o coeficiente de rugosidade de Manning ($\text{s.m}^{-1/3}$).

4.3.2. Pressões médias

Analogamente ao processo de análise dos dados de lâmina d'água média, inicialmente, os dados de pressões médias, obtidas a partir dos tubos piezométricos, foram plotados em gráficos, a partir do software Excel, visando a observação inicial da distribuição das informações e a busca de tendências comportamentais.

A observação dos dados de pressões médias nas condições ensaiadas, conforme demonstrado, posteriormente, nos resultados experimentais, sugere uma tendência de sobreposição de cargas de pressão provenientes de efeitos distintos. Nesta abordagem, similar ao proposto por Dai Prá (2011), nota-se que a carga de pressão média é composta de uma parcela proveniente do escoamento livre, sem a formação de ressalto hidráulico, e uma parcela gerada exclusivamente pela formação do fenômeno.

Portanto, a metodologia desenvolvida para estimar as pressões médias no sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, em condições de formação de ressalto com diferentes graus de submergência, envolve a relação estabelecida na Equação 23. Nos itens subsequentes, as análises realizadas para cada uma das parcelas de pressão média são exibidas em detalhes.

$$P_{méd (total)} = P_{méd (EL)} + P_{méd (RH)} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$P_{méd (EL)}$ é a parcela de pressão média proveniente do escoamento livre (m.c.a.);

$P_{méd (RH)}$ é a parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico (m.c.a.);

$P_{méd (total)}$ é a pressão média total ocorrente no local da tomada de pressão (m.c.a.).

4.3.2.1. Escoamento livre

A parcela de pressão média associada ao escoamento livre foi obtida diretamente dos ensaios realizados nesta condição, para as quatro vazões analisadas. Entretanto, a metodologia proposta para estimar esta parcela, da pressão média total, necessitou da realização do processamento dos dados.

A visualização das pressões médias sob condições de escoamento livre conduziu à divisão do sistema extravasor estudado em quatro trechos, conforme ilustrado na Figura 31. A divisão e escolha das tomadas pertencentes a cada trecho se deu a partir da identificação das características hidráulicas mais influentes na carga de pressão atuante em cada local. Após a figura, encontram-se as descrições e explicações referentes a cada trecho pertencente à análise.

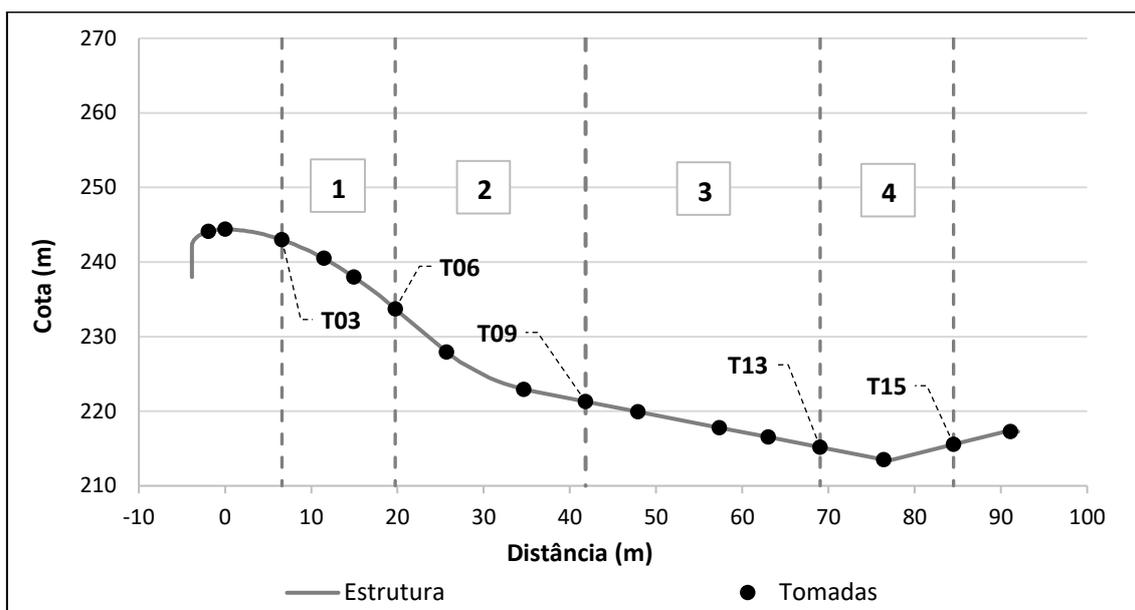


Figura 31. Divisão, do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, adotada para a análise da parcela de pressão média proveniente do escoamento livre.

4.3.2.1.1. Trecho 1

O primeiro trecho de análise refere-se ao segmento da estrutura compreendido entre as tomadas T03 e T06. O trecho situa-se inteiramente sobre o perfil da soleira Creager, iniciando-se logo a jusante do batente da comporta.

Para os dados de pressão média referentes ao trecho 1, não foi realizado nenhum procedimento para o agrupamento dos mesmos. Posteriormente, a partir da visualização dos resultados experimentais, torna-se possível compreender, e comprovar, a ausência de necessidade dos procedimentos citados.

4.3.2.1.2. Trecho 2

O segundo trecho de análise refere-se ao segmento da estrutura compreendido entre as tomadas T06 e T09. O trecho tem início junto com a curva

de concordância entre a soleira Creager e a bacia em declive e termina na primeira tomada de pressão que está inteiramente sobre a estrutura de dissipação.

A análise dos dados de pressão média referentes ao trecho 2 envolveu a utilização da teoria sobre curvas verticais, apresentada na Equação 3 e Equação 4 (BAPTISTA E LARA, 2010). Contudo, diferentemente do apresentado anteriormente, este estudo propõe a alteração no parâmetro R, referente ao raio de curvatura do fundo da estrutura.

Neste caso, acredita-se que o raio de curvatura realmente influente, sobre o acréscimo ou decréscimo de pressão proveniente de uma curva vertical, seja o raio das linhas de corrente do fluxo no local, sendo este, variável, por exemplo, com a vazão. Desta forma, a metodologia propõe a substituição, na Equação 4 do raio de curvatura (R) pelo raio de curvatura virtual ($R_{virtual}$), de modo que a relação fica reescrita conforme a Equação 24.

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{hv^2}{gR_{virtual}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

$R_{virtual}$ é o raio virtualmente assumido pelas linhas de corrente do fluxo (m).

A obtenção do parâmetro $R_{virtual}$ se deu a partir da observação dos dados de pressão média, no trecho, comparados à teoria apresentada pela Equação 3 e Equação 4. Assim, com o objetivo de alinhar a metodologia das curvas verticais com os dados medidos, identificou-se a necessidade de empregar um raio de curvatura variável, tanto em relação à vazão, como em relação à posição ao longo da curva.

Objetivando simplificar a obtenção do raio de curvatura virtual, durante a aplicação da metodologia proposta, estabeleceu-se uma relação adimensional utilizando a altura crítica do escoamento, obtida pela Equação 25. O uso da altura crítica visa expressar a influência da vazão na determinação desse parâmetro. Na Equação 26 é apresentada a forma de relação estabelecida para o trecho 2.

$$h_c = \left(\frac{q^2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Equação 25}$$

$$\frac{R_{virtual}}{h_c} = f(X) \quad \text{Equação 26}$$

Onde:

h_c é a altura crítica (m);

q é a vazão específica, obtida por Q/B , sendo B a largura do canal ($m^3/s/m$).

4.3.2.1.3. Trecho 3

O terceiro trecho de análise abrange a parte da estrutura localizada entre as tomadas T09 e T13. Este segmento encontra-se completamente posicionado sobre a bacia de dissipação em declive.

A distribuição das pressões médias no trecho em questão, conforme demonstrado, posteriormente, nos resultados experimentais, mostra uma significativa dependência do valor da vazão. Além disso, entende-se que, nas extremidades do trecho, há uma pequena sobrepressão influenciada pelas curvas verticais presentes nos trechos 2 e 4. Na Equação 27 é exibida a forma de relação estabelecida para o trecho 3, onde, novamente, utilizou-se o parâmetro de altura crítica para expressar, na relação adimensional, a influência da vazão nas pressões médias.

$$\frac{P_{méd(EL)}}{h_c} = f(X) \quad \text{Equação 27}$$

4.3.2.1.4. Trecho 4

O quarto trecho de análise refere-se ao segmento da estrutura compreendido entre as tomadas T13 e T15. O trecho começa no final da bacia de dissipação inclinada e tem fim na parte ascendente da soleira terminal.

Devido ao fato de o sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó possuir uma bacia de dissipação em declive, seguida de uma soleira terminal, o segmento compreendido, nesta análise, como trecho 4 possui uma geometria de fundo em “V”, no sentido longitudinal. No entanto, é sabido que, nesses casos, devido às forças inerciais e gravitacionais envolvidas, as linhas de corrente do fluxo não exibem curvatura tão acentuada, em “V”, mas sim, apresentam raios mais suaves e hidrodinâmicos.

Portanto, baseado nas afirmações explanadas, optou-se, nesse estudo, por analisar a região abrangida pelo trecho 4 de forma similar a uma concha, ou seja, uma curva vertical com raio diferente de zero. Sendo assim, a relação analítica estabelecida e utilizada no trecho em questão é a mesma determinada para o trecho 2, conforme a Equação 26.

4.3.3. Ressalto hidráulico

De maneira contrária à parcela de pressão média associada ao escoamento livre, a parcela relacionada exclusivamente à formação do ressalto hidráulico não foi obtida diretamente a partir das medições com tubos piezométricos. Para a obtenção desta fração de pressão, necessitou-se subtrair a parcela de pressão média originária do escoamento livre, da pressão média total medida em condições de formação de ressalto nos diferentes níveis de submersão ensaiados. Na forma matemática, obteve-se a parcela de pressão média, em questão, através da Equação 23, isolando o termo de interesse.

Com a determinação isolada da parcela de pressão média referente à formação do ressalto hidráulico, tornou-se possível buscar e estabelecer relações que permitem o melhor agrupamento dos dados frente as diferentes condições ensaiadas. Para esta finalidade, parâmetros relacionados ao início do ressalto hidráulico, como posição e altura conjugada rápida, mostraram-se adequados e suficientes, como se pode constatar, futuramente, nos resultados. Entretanto, para esta etapa do processamento de dados, novamente, dividiu-se o sistema extravasor em dois trechos de comportamentos distintos.

Diante do contexto descrito, para a posterior aplicação final da metodologia proposta, fez-se necessária a elaboração de um método para estimar a posição aproximada de início do ressalto hidráulico. Nos subtópicos a seguir são exibidos e explicados os métodos utilizados na abordagem de determinação das pressões médias nos dois trechos estabelecidos ao longo do sistema extravasor e do início do ressalto hidráulico.

4.3.3.1.1. Trechos 1 e 2

No processamento dos dados referentes à parcela de pressão média associada ao ressalto hidráulico, conforme citado anteriormente, se fez

necessária a divisão do sistema extravasor em dois trechos. O trecho 1 compreende a maior parte do sistema extravasor, estendendo-se da posição de início do ressalto até a tomada T13. Em contrapartida, o trecho 2 compreende apenas a região das tomadas T14 e T15.

Nesta etapa, o agrupamento dos dados se deu a partir das mesmas relações adimensionais, válidas para os dois trechos. Entretanto, os equacionamentos estabelecidos, e apresentados nos resultados, para cada trecho são completamente distintos. Na Equação 28, exposta a seguir, é possível visualizar a forma geral da relação estabelecida para a determinação fração de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, envolvendo a utilização da posição de início do ressalto e da lâmina d'água nesta posição.

$$\frac{P_{méd(RH)}}{h_1} = f\left(\frac{X - X_1}{h_1}\right) \quad \text{Equação 28}$$

Onde:

X_1 é a posição aproximada de início do ressalto (m);

h_1 é a altura conjugada rápida, ou altura de lâmina d'água no início do ressalto hidráulico (m).

4.3.3.1.2. Posição de início do ressalto

Para determinar o trecho de ocorrência da parcela de pressão média originada pelo ressalto hidráulico, por óbvio, é necessário identificar a posição a partir da qual o fenômeno se desenvolve. Além disso, conforme adiantado no item anterior, a informação de posição de início do ressalto se mostrou eficaz no agrupamento dos dados, reforçando a importância de sua determinação.

A visualização das pressões médias, medidas com escoamento livre e com formação de ressalto hidráulico em diferentes níveis de submergência, plotadas graficamente em conjunto, permite a determinação aproximada da posição de início do ressalto. Definiu-se esta posição, a partir da análise comparativa das séries de dados para uma mesma vazão, como o ponto onde as pressões médias ocorrentes sob condições de formação de ressalto começam a distanciar-se dos valores ocorrentes em escoamento livre, ou seja, a última tomada de pressão onde as pressões médias se assemelham. Esta perspectiva é condizente à relação estabelecida na Equação 23, visto que, nas regiões onde

não há formação do ressalto hidráulico, a parcela de pressão média proveniente do fenômeno é nula, fazendo com que a pressão média total seja igual a parcela de pressão média associada ao escoamento livre.

Como forma de estimar a posição de início do ressalto, visando a aplicação da metodologia proposta, se estabeleceu, no processamento dos dados, dois adimensionais envolvendo a altura crítica do escoamento, o nível de água a jusante do sistema extravasor e o nível de água no reservatório. A combinação destes parâmetros, na forma exibida na Equação 29, propiciou um satisfatório agrupamento das informações.

$$\frac{X_1}{h_c} = f\left(\frac{NA_{jus}}{NA_{mon}}\right) \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

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).

4.3.4. Resumo analítico

Diante das subdivisões longitudinais aplicadas ao sistema extravasor durante os processos realizados, neste item, são expostos os trechos, e respectivas delimitações, utilizadas na análise de cada parâmetro. Na Tabela 5, os dados supracitados encontram-se, resumidamente, apresentados.

Tabela 5. Resumo das subdivisões longitudinais aplicadas nas análises.

Parâmetro	Trecho	Tomadas
$h_{méd}$	1	T03 à T09
	2	T09 à T15
$P_{méd} (EL)$	1	T03 à T06
	2	T06 à T09
	3	T09 à T13
	4	T13 à T15
$P_{méd} (RH)$	1	X_1 à T13
	2	T14 à T15

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A descrição dos resultados experimentais e analíticos foi organizada seguindo o ordenamento apresentado na metodologia. Sendo assim os resultados encontram-se expostos, principalmente, como resultados experimentais, ajustes e equacionamentos e aplicação final da metodologia. Juntamente, serão explanadas as discussões e principais observações a respeito dos resultados obtidos.

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS – DADOS BRUTOS

Os dados brutos são definidos como os dados obtidos diretamente das medições realizadas durante os ensaios. Desta forma, neste tópico são apresentados os resultados de lâmina d'água média e pressão média adquiridos, respectivamente, a partir das medições com ponta linimétrica e tubos piezométricos.

Salienta-se que, devido aos instrumentos utilizados, entende-se haver maior suscetibilidade a erros de medição relacionados às lâminas d'água médias em comparação com as pressões médias. Em escoamentos rápidos, como é o caso no sistema extravasor estudado, a superfície livre costuma apresentar variações de nível frequentes, dificultando a leitura com a ponta linimétrica. Por outro lado, as medições de pressão média, realizadas com tubos piezométricos, são consideradas menos vulneráveis a erros de leitura.

5.1.1. Lâmina d'água média

As lâminas d'água médias foram medidas com a utilização de pontas linimétricas, durante a realização dos ensaios sob condições de escoamento livre (sem a formação do ressalto hidráulico). Na Figura 32a, os dados são apresentados na forma de cota da linha d'água, ou seja, com a lâmina medida somada à cota de fundo da estrutura. Por outro lado, na Figura 32b são exibidos os valores brutos, diretamente medidos. Em ambos os gráficos, também, são indicados os dois trechos utilizado no processamento dos dados.

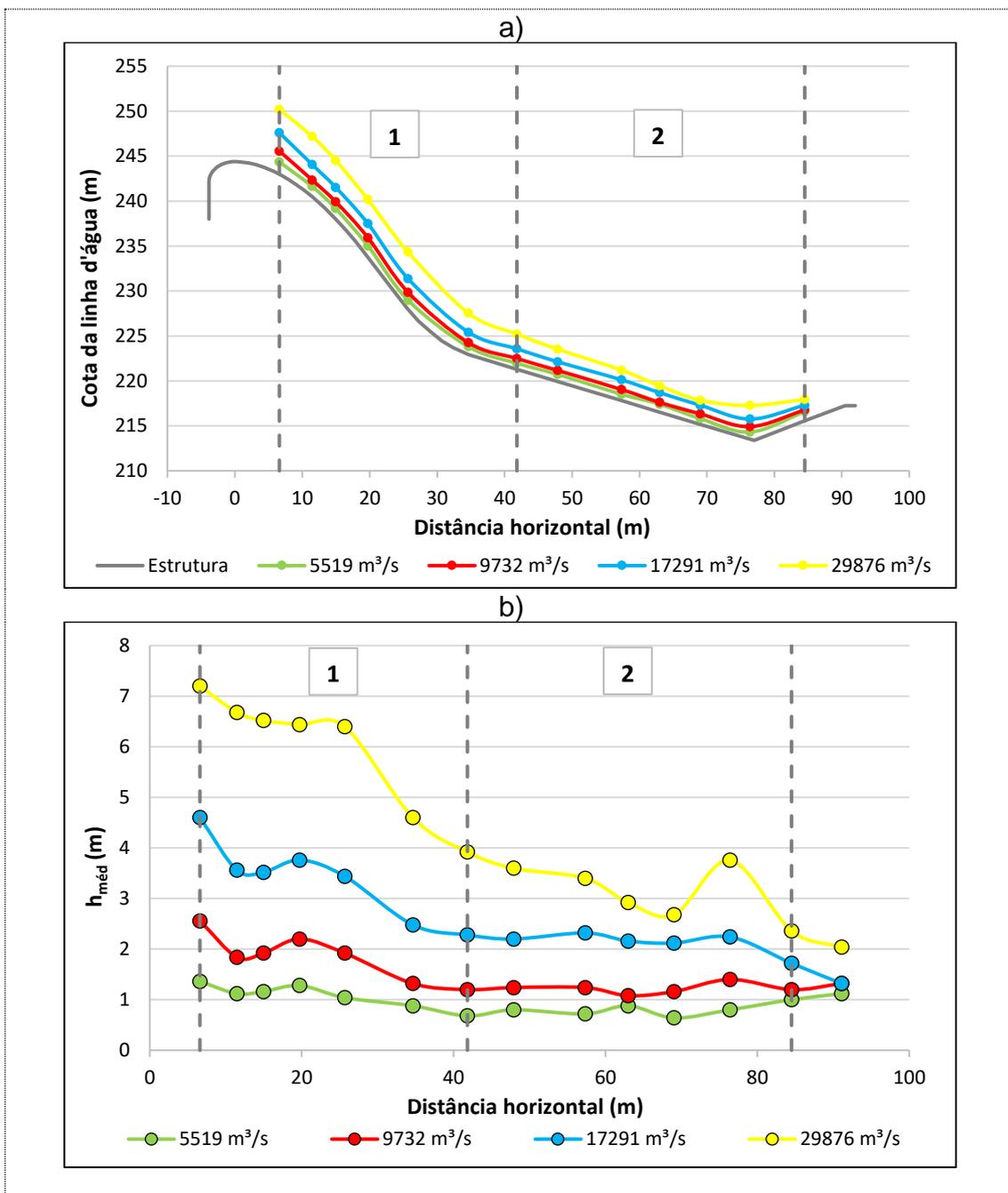


Figura 32. Lâminas d'água médias, medidas nos ensaios com escoamento livre, apresentadas na forma de cota da linha d'água (a) e valor bruto (b).

Conforme o esperado, se percebe a diminuição das lâminas d'água médias à medida que a vazão diminui. Além disso, nota-se um comportamento relativamente semelhante entre as três menores vazões ensaiadas. Em contrapartida, a disposição dos dados referentes à maior vazão destoa das demais.

Para as vazões de 5519, 9732 e 17291 m³/s, se constata um decréscimo inicial da lâmina média, sobre a soleira Creager, seguido de uma elevação na

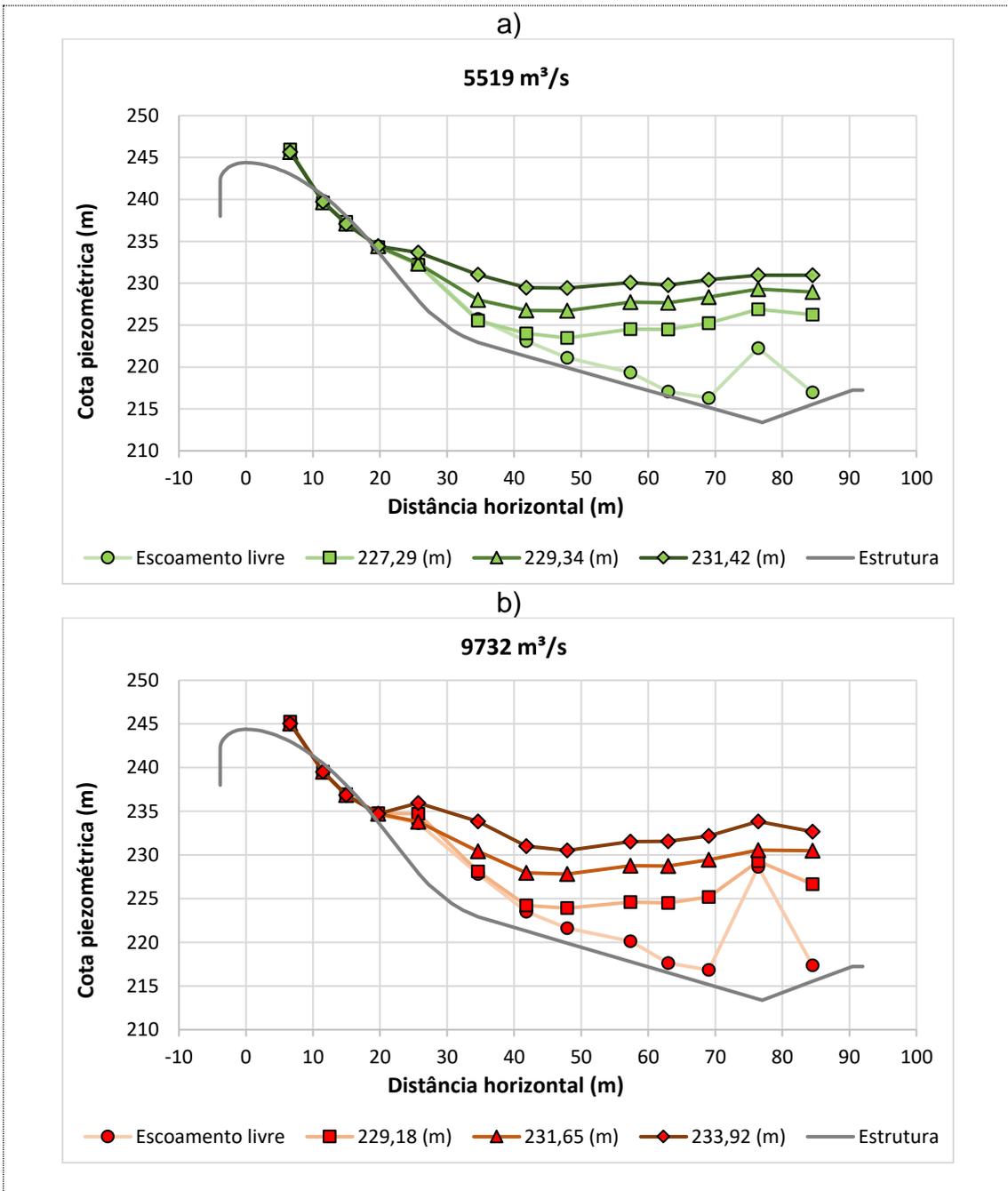
tomada T06, próximo da distância horizontal de 20 m, no começo da curva de concordância. Outro aspecto de destaque para estas vazões é o comportamento aproximadamente constante das lâminas ocorrentes sobre a bacia de dissipação em declive e soleira terminal, no trecho 2.

Por outro lado, a vazão de 29876 m³/s exibiu uma tendência de diminuição mais acentuada da lâmina média ao longo de quase todo o sistema extravasor. Esta ocorrência pode ser causada pela diferença entre a abertura da comporta e a altura normal do escoamento, para cada vazão, podendo o escoamento ainda estar sob efeitos de remanso. Na maior vazão, a diferença entre os dois parâmetros é mais significativa, de forma que ao longo de, praticamente, todo o sistema extravasor, a altura normal não é atingida.

Adicionalmente, destaca-se, como exceção, a tomada T14, região do vértice formado pelo final da bacia de dissipação inclinada e início da soleira terminal. Neste local, percebe-se uma elevação de mais de 1 m na lâmina d'água média. Sobre essa constatação, acredita-se que ela pode ser justificada pelo fato de que, nessa vazão específica, a superfície livre sofre menos influência do vértice entre a bacia de dissipação inclinada e a soleira terminal.

5.1.2. Pressões médias

Conforme já mencionado na metodologia, as pressões médias, neste estudo, foram medidas com o uso de piezômetros, sendo coletadas durante todos os 16 ensaios realizados. Na Figura 33 podem ser observados, na forma de cota piezométrica, as pressões médias medidas entre as tomadas T03 e T15. As séries de dados são exibidas e agrupadas por vazão (a até d), visando a observação comparativa dos dados obtidos em condições de escoamento livre e com formação de ressalto em diferentes graus de submergência.



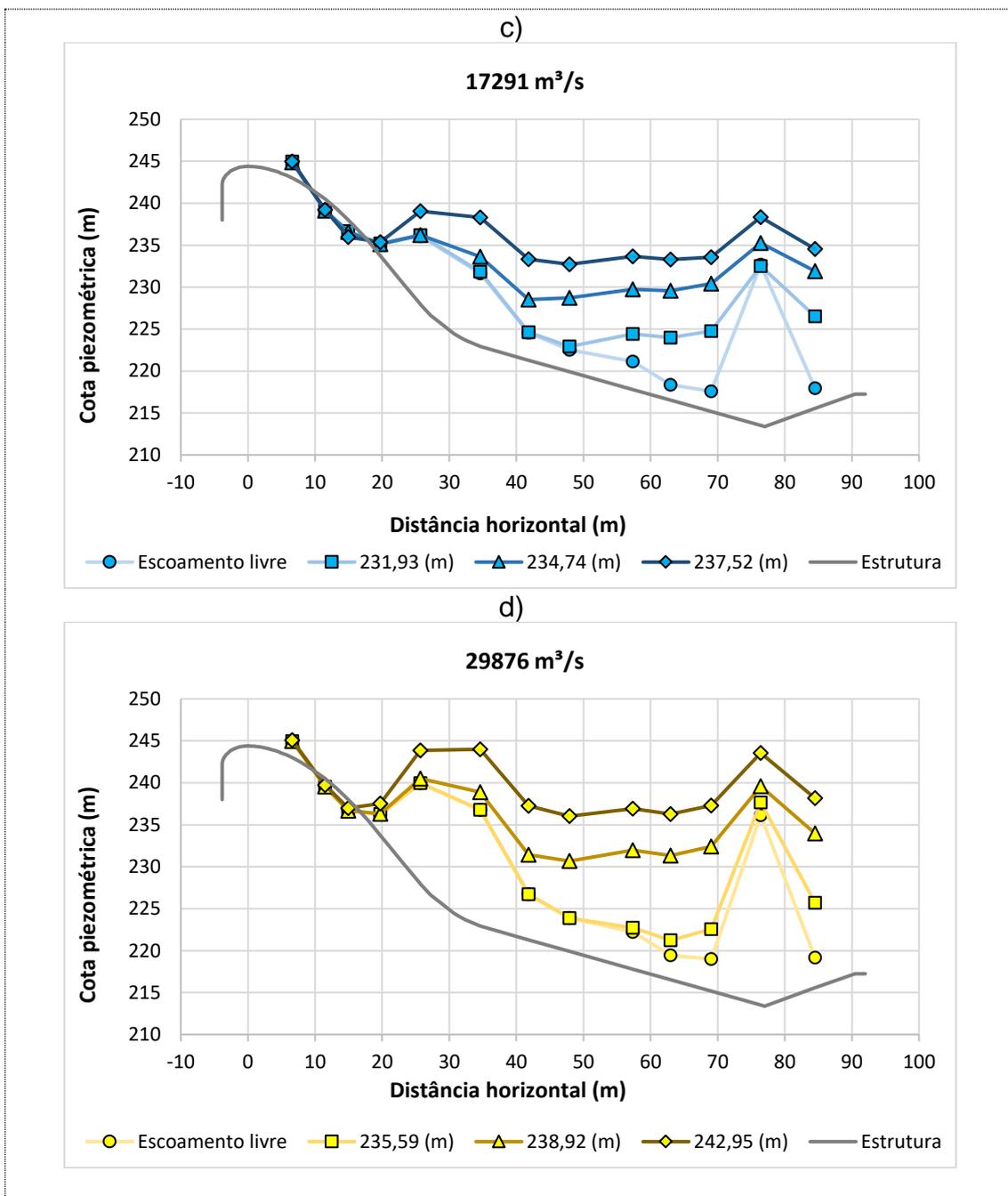


Figura 33. Pressões médias, na forma de cota piezométrica, medidas durante os ensaios realizados com as vazões: a) 5519 m³/s, b) 9732 m³/s, c) 17291 m³/s e d) 29876 m³/s.

Os dados de pressões médias, apresentados na Figura 33, demonstram o comportamento das pressões atuantes sobre o sistema extravasor estudado. A partir destes gráficos é possível identificar que os efeitos, tais como do ressalto hidráulico, geometria da estrutura e vazão, afetam as pressões.

Ainda, a observação dos gráficos permite a visualização do efeito da comporta sobre a soleira Creager e a identificação, aproximada, do ponto de início do ressalto hidráulico. A metodologia aplicada na determinação do ponto

de início do ressalto pode ser contemplada no item 4.3.3.1.2. Na Tabela 6 são exibidas as tomadas de início do ressalto, para cada condição ensaiada, determinadas a partir das pressões medidas.

Conforme expresso anteriormente, a soleira Creager origina-se da teoria de soleira normal, visando a prevenção contra pressões negativas (CREAGER e JUSTIN,1950 apud ARAUZ, 2005). Porém, como pode ser visto, com o escoamento regulado pela presença da comporta na estrutura, em todos os ensaios foram registradas pressões negativas sobre a soleira, indicando o descolamento do fluxo no local.

Tabela 6. Ponto de início do ressalto hidráulico identificado a partir das pressões médias.

Q (m³/s)	NA_{jus} (m)	Tomada de início do ressalto	X₁ (m)
5519	227,29	T08	34,63
	229,34	T07	25,68
	231,42	T06	19,74
9732	229,18	T08	34,63
	231,65	T07	25,68
	233,92	T06	19,74
17291	231,93	T10	47,90
	234,74	T07	25,68
	237,52	T06	19,74
29876	235,59	T10	47,90
	238,92	T06	19,74
	242,95	T05	14,96

Na Figura 34 são expostos os resultados de pressão média em condições de escoamento livre, desta vez, com as vazões plotadas em conjunto. Ao observar o gráfico foram identificadas quatro regiões onde as séries de dados exibem comportamentos distintos e característicos, em virtude dos parâmetros mais influentes. Portanto, com base nessa observação, originou-se a perspectiva de subdividir o sistema extravasor em quatro trechos de análise, cada um com ajustes individuais, conforme será apresentado em itens subsequentes.

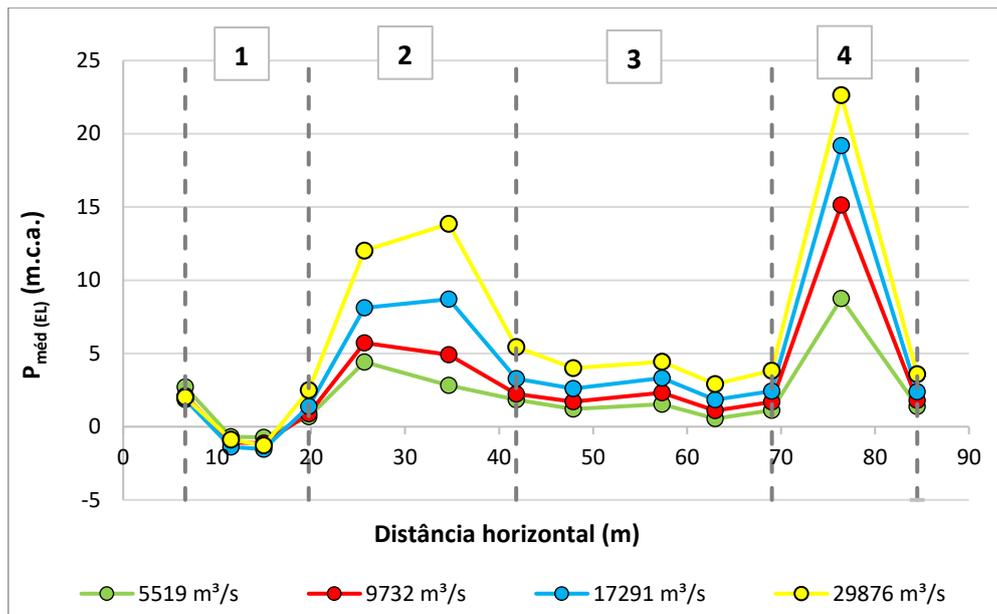


Figura 34. Pressões médias medidas sob condições de escoamento livre.

5.2 AJUSTES E EQUACIONAMENTOS

O processamento dos dados visou o agrupamento das diferentes séries de dados medidos. Em alguns casos foi necessário estabelecer relações adimensionais para a aproximação das séries. Diante dos melhores agrupamentos obtidos, ajustes foram realizados, determinando equacionamentos que permitam estimar as pressões médias e/ou parâmetros intermediários. Os ajustes e equacionamentos desenvolvidos encontram-se exibidos nos subtópicos a seguir.

5.2.1. Lâmina d'água média

A distribuição dos dados de lâmina d'água média, exibidos na Figura 32, indicam a existência de dois trechos de comportamentos distintos, compreendendo, basicamente, o vertedouro e a bacia de dissipação. O desenvolvimento de uma metodologia para estimar a lâmina d'água média, em escoamento livre, se fez necessária para a aplicação da teoria das curvas verticais, nos trechos 2 e 4 de estimativa da $P_{méd(EL)}$, e na determinação da altura conjugada rápida, a partir da informação de X_1 , na estimativa da $P_{méd(RH)}$. A seguir, são apresentados os ajustes e equacionamentos propostos para cada trecho.

5.2.1.1. Trecho 1

O trecho 1 compreende o vertedouro da UHE Foz do Chapecó, representando, quase em sua totalidade, o perfil Creager. Neste trecho é possível identificar a influência da vazão sobre a dispersão dos dados.

Diante do fato exposto, realizou-se a adimensionalização da lâmina d'água média através da abertura de comporta para cada vazão. O parâmetro da abertura de comporta expressa relação direta com a vazão e mostrou significativa influência no escoamento, especialmente sobre o vertedouro, agrupando as séries de dados das diferentes vazões. Na Figura 35 pode-se observar o ajuste realizado para o trecho em questão, o qual apresentou o coeficiente R^2 igual a 0,92.

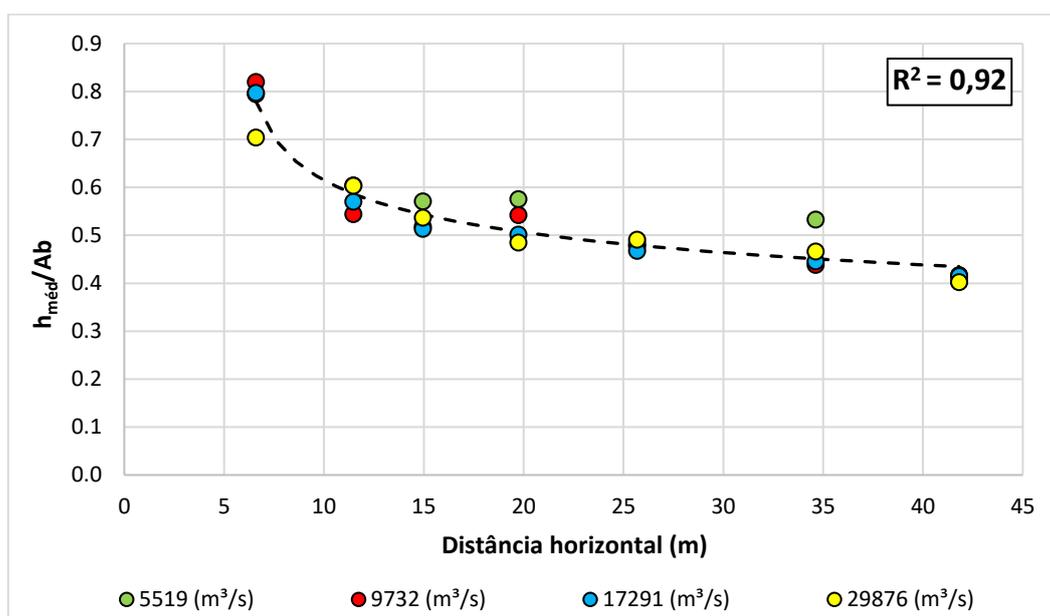


Figura 35. Ajuste realizado para o trecho 1 da análise de lâmina d'água média.

A respectiva equação, associada ao ajuste, é exibida, a seguir, como Equação 30.

$$\frac{h_{méd}}{Ab} = 0,7874(X - 5,5302)^{-0,1654} \quad \text{Equação 30}$$

5.2.1.2. Trecho 2

O trecho 2 compreende a bacia de dissipação da UHE Foz do Chapecó quase em sua totalidade, excluindo o trecho inicial, até a tomada T09, e incluindo parte da soleira terminal. Conforme apresentado no item 5.1.1, e na Figura 32,

as lâminas d'água médias desenvolvem-se aproximadamente constantes para as três vazões menores, ao longo deste trecho. Quanto à maior vazão, esta possui tendência de diminuição ao longo do segmento, contudo, com uma linha de tendência de declividade pequena.

Para esta região do sistema extravasor decidiu-se estabelecer um valor de lâmina d'água média constante para todas as posições, entendendo que o dado é bastante representativo para as vazões menores e acarreta em certa incerteza para a vazão maior. Assim, se associou esta lâmina d'água média apenas à vazão, e não à posição, estabelecendo o ajuste apresentado na Figura 36. Para vincular à vazão, nesse contexto, fez-se uso da altura normal do escoamento. Destaca-se que para o ajuste apresentado, apenas os valores médios (marcadores preenchidos) foram utilizados, sendo as demais alturas de lâmina d'água (marcadores vazados) apresentadas apenas para visualização da dispersão.

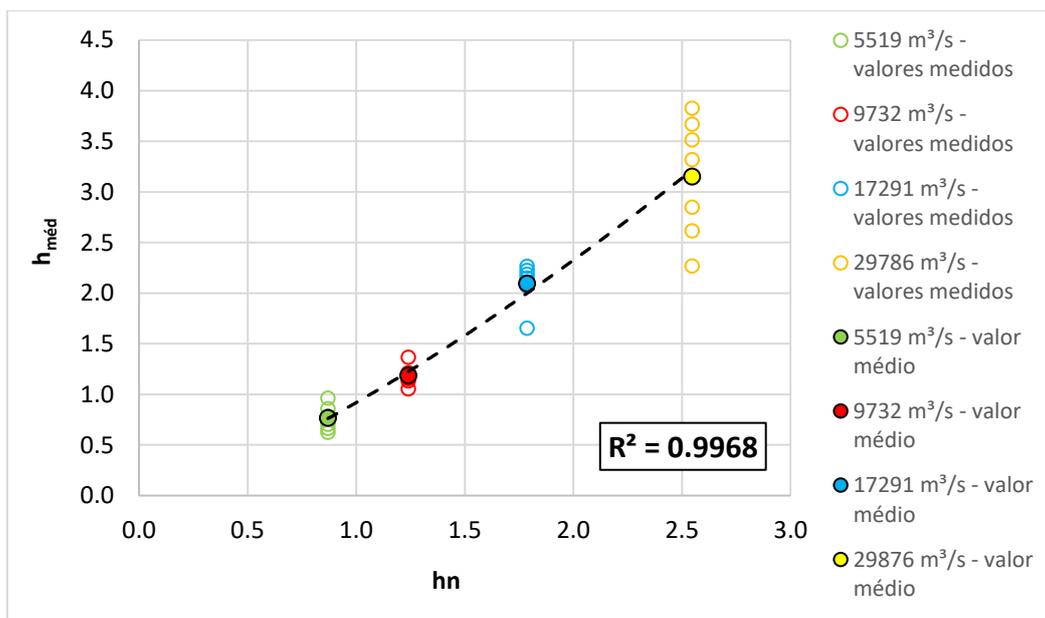


Figura 36. Ajuste realizado para o trecho 2 da análise de lâmina d'água média.

A respectiva equação, associada ao ajuste, é exibida, a seguir, como Equação 31.

$$h_{méd} = 0,9183h_n^{1,3402}$$

Equação 31

Comparativamente, o ajuste realizado para o trecho 1 (T03 à T09) apresentou resultados significativamente melhores que o ajuste do trecho 2 (T09 à T15). Embora o coeficiente de determinação obtido para o trecho 1 tenha sido inferior ao do trecho 2, respectivamente, 0,92 e 0,9968, a abordagem empregada ao segundo trecho apresentou maiores falhas, especialmente para a maior vazão. Isso se deve à premissa da abordagem de que a lâmina d'água mantém um valor médio e constante ao longo de toda a bacia de dissipação. No entanto, como mencionado anteriormente, a série de dados de lâmina d'água média, referente à maior vazão, apresenta comportamento incompatível com essa proposta.

5.2.2. Pressões médias

Os dados de pressão média foram divididos a partir da perspectiva de sobreposição de efeitos, conforme explicado na metodologia. Desta forma, a seguir, são exibidos os resultados dos ajustes e equacionamentos obtidos no processamento de dados referentes às parcelas de pressão média vinculadas ao escoamento livre e à formação do ressalto hidráulico.

5.2.2.1. Escoamento livre

A análise da parcela de pressão média proveniente do escoamento livre direcionou o processamento dos dados à divisão do sistema extravasor em quatro segmentos distintos. Logo, a abordagem utilizada em cada trecho foi individual, resultando nos ajustes e equacionamentos expostos nos subitens seguintes.

5.2.2.1.1. Trecho 1

Os dados medidos ao longo do trecho 1 correspondem às pressões médias sobre a soleira Creager. Como pôde ser observado na Figura 34, neste trecho, os dados brutos apresentaram um agrupamento significativamente bom, tendo em vista o R^2 , sem exigir qualquer tipo de adimensionalização. Esta observação revela que as pressões médias atuantes neste segmento da estrutura são

dependentes da sua posição longitudinal, mas têm pouca ou nenhuma relação com a vazão escoada. Neste caso, presume-se que o escoamento está em fase inicial de desenvolvimento, ocorrendo, ainda, de maneira semelhante sob distintas condições de vazão. O ajuste aplicado aos dados encontra-se exposto na Figura 37, o qual apresentou o coeficiente de determinação igual a 0,92.

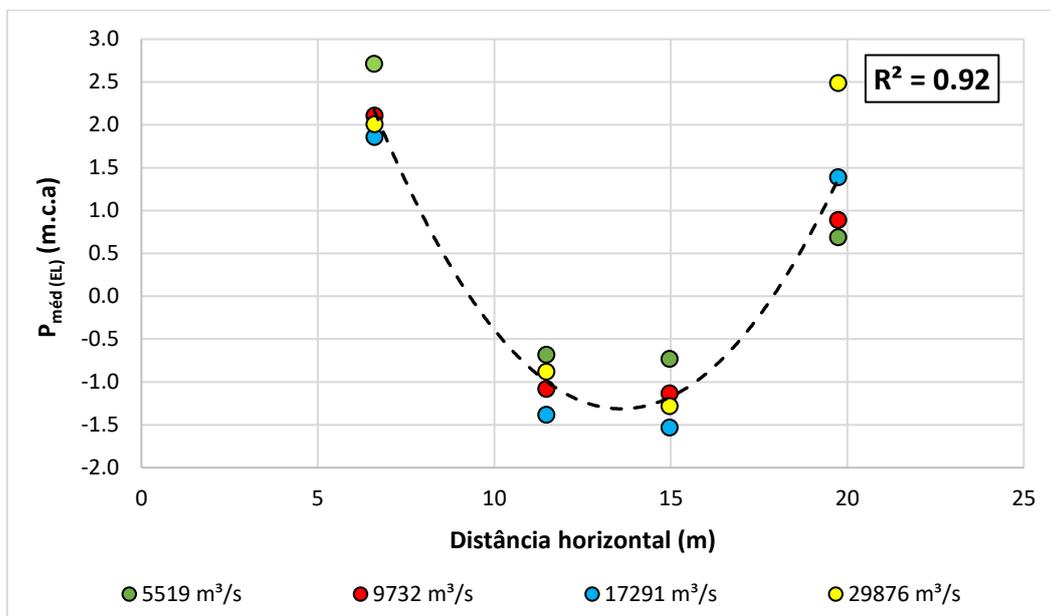


Figura 37. Ajuste realizado para o trecho 1 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.

A equação associada ao ajuste apresentado é exibida na sequência, como Equação 32.

$$P_{méd(EL)} = 0,0711X^2 - 1,9337X + 11,8339 \quad \text{Equação 32}$$

Ainda, nota-se, neste trecho, a ocorrência de pressões médias negativas sobre a soleira Creager. Conforme mencionado anteriormente, a soleira Creager possui origem vinculada à teoria de soleira normal, visando a prevenção de pressões negativas. Contudo, neste caso, devido à presença e operação da comporta, entende-se que há um aumento das velocidades iniciais, devido à pressão exercida pela coluna de água presente no reservatório, provocando o descolamento do fluxo sobre certa região da soleira.

5.2.2.1.2. Trecho 2

O trecho 2 corresponde, principalmente, à curva de concordância entre a soleira Creager e a bacia de dissipação. Como detalhado na metodologia, a abordagem adotada, para este segmento da estrutura, fez uso da clássica teoria de pressões em curvas verticais, entretanto, com a substituição do parâmetro R pelo proposto R_{virtual} . Diante dos fatos explanados, o processamento dos dados e ajustes realizados visaram possibilitar a determinação do R_{virtual} para que, este, seja utilizado nas equações da teoria de curvas verticais. O ajuste empregado ao trecho em questão, envolvendo o uso da altura crítica do escoamento, é exibido na Figura 38, apresentando um coeficiente R^2 igual a 0,82.

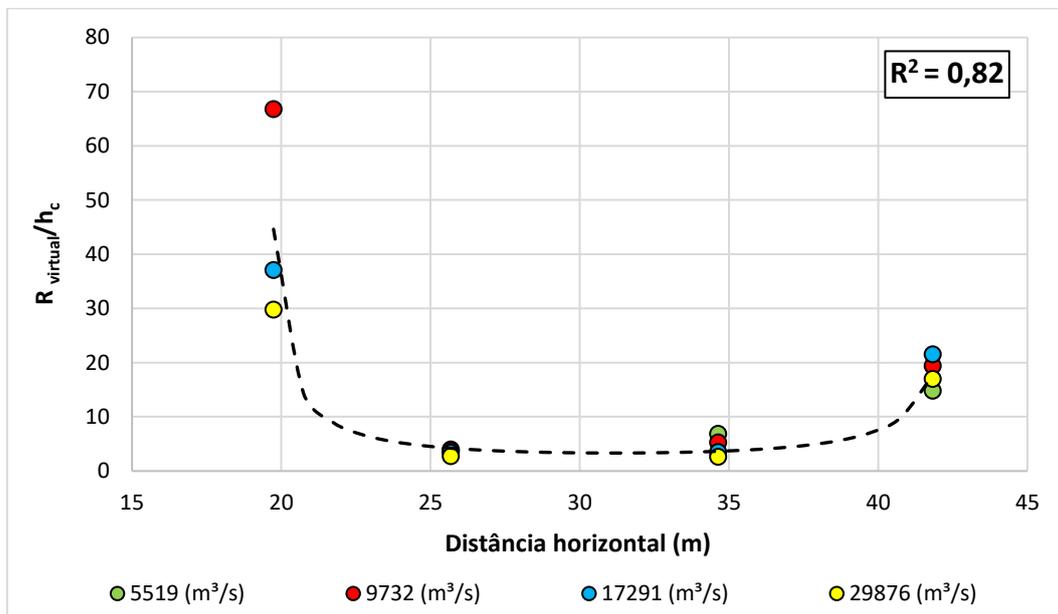


Figura 38. Ajuste realizado para o trecho 2 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.

Observando a figura apresentada, percebe-se a ausência, na tomada T06 (distância horizontal próximo de 20m), do ponto referente à vazão de 5519 m^3/s . O dado em questão foi omitido do ajuste em virtude de apresentar um valor extremamente elevado, com um R_{virtual} de mais de 1 km. Nota-se, a partir da Equação 24, que quanto maior o R_{virtual} , menor a influência deste na correção da pressão (ΔP). Desta forma, entende-se que para a menor vazão ensaiada, na tomada T06, a curva de concordância não exerce influência nas pressões médias, justificando a exclusão deste dado durante o processo de ajuste.

Destaca-se, positivamente, que a abordagem apresentou os menores valores de R_{virtual} , e conseqüentemente maior influência sobre a carga de

pressão, na região central da curva, sendo as tomadas T07 e T08. Este comportamento entende-se adequado com a realidade do fenômeno.

Cabe ressaltar que para a aplicação da teoria apresentada para curvas verticais, o usuário deve atentar-se ao sinal do fator de correção da pressão. Para curvas côncavas o sinal deve ser adotado como positivo, enquanto para curvas convexas, o mesmo é negativo. Na aplicação efetuada neste estudo, no trecho 2, foi inserido o sinal negativo para a T06 e sinal positivo para as demais tomadas do trecho.

O equacionamento associado ao ajuste empregado neste trecho é exibido na Equação 33.

$$\frac{R_{virtual}}{h_c} = \frac{1}{(-1,7824 + 0,1339X - 0,00215X^2)} \quad \text{Equação 33}$$

5.2.2.1.3. Trecho 3

Com relação ao trecho 3, este situa-se totalmente sobre a bacia de dissipação em declive. Percebe-se, neste trecho, a partir da Figura 34, uma influência significativa da vazão sobre as pressões médias obtidas nesta região, uma vez que as pressões aumentam com o aumento da vazão. O ajuste elaborado para o trecho 3 é apresentado na Figura 39 .

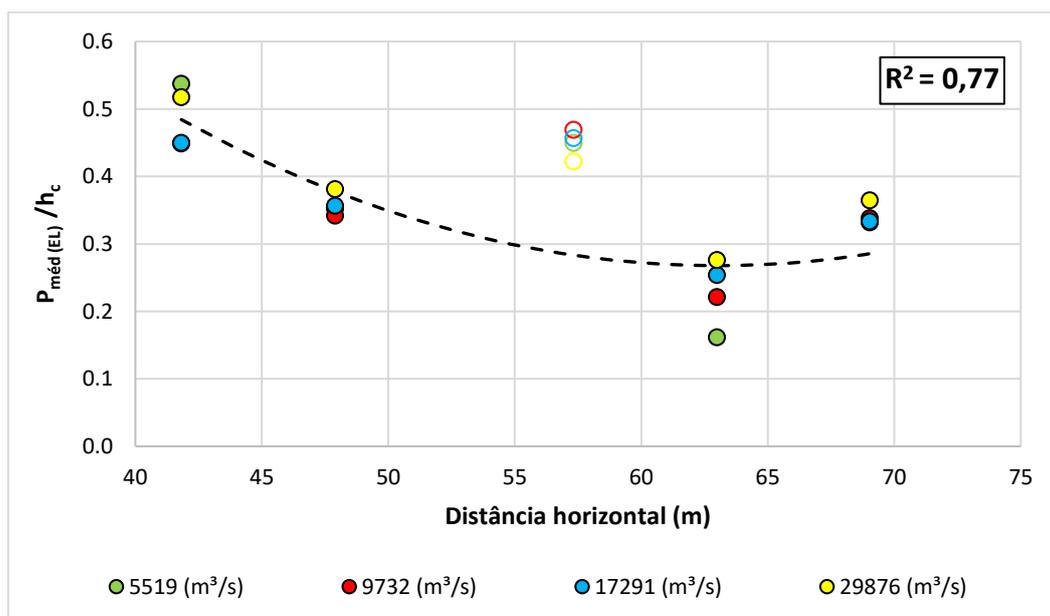


Figura 39. Ajuste realizado para o trecho 3 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.

Em condições de escoamento livre sobre a bacia de dissipação inclinada, espera-se haver a diminuição das cargas de pressão à medida que a carga cinética aumenta, o que ocorre no mesmo sentido de crescimento da posição longitudinal. Entretanto, conforme pode ser visualizado na Figura 39, as pressões médias registradas na tomada T11 apresentaram um comportamento incoerente, com valores mais elevados do que o esperado. Neste caso, suspeita-se ter ocorrido algum tipo de erro de medição durante os respectivos ensaios. Por esta razão, os dados coletados na referida tomada, não foram incluídos no processo de ajuste realizado para o trecho.

Comparativamente, entre os quatro segmentos, o trecho 3 foi o que apresentou ajuste com menor coeficiente de determinação (0,77). Particularmente, esse trecho situa-se entre duas curvas verticais côncavas (tratando o trecho 4 como uma forma de concha). Desta forma, nas tomadas que delimitam o trecho, T09 e T13, ainda se observam pequenos vestígios da influência das curvas verticais a montante e jusante, respectivamente. Devido ao fato de que a conexão entre a bacia de dissipação e a soleira terminal não constitui exatamente uma curva, os efeitos gerados por este trecho se manifestam de forma mais abrupta. Assim, a elevação da $P_{méd(EL)}$ observada na tomada T13, não foi bem correspondida pelo ajuste adotado para o trecho 3, ocasionando um coeficiente R^2 inferior.

O equacionamento referente ao ajuste das pressões médias no trecho 3 é apresentado na Equação 34.

$$\frac{P_{méd(EL)}}{h_c} = (0,000483X^2) - (0,06085X) + 2,1839 \quad \text{Equação 34}$$

5.2.2.1.4. Trecho 4

No trecho 4, que abrange a região de encontro entre a bacia de dissipação em declive e a parte ascendente da soleira terminal, optou-se por seguir uma abordagem análoga à aplicada ao trecho 2, tratando-o como uma curva vertical. Conforme detalhado na metodologia, essa abordagem está fundamentada na premissa de que as linhas de corrente do fluxo assumem curvaturas com raio diferente de zero, como hipoteticamente ocorre no vértice deste trecho. Sendo

assim, na Figura 40 é exibido o ajuste aplicado ao dados obtidos nesse segmento da estrutura.

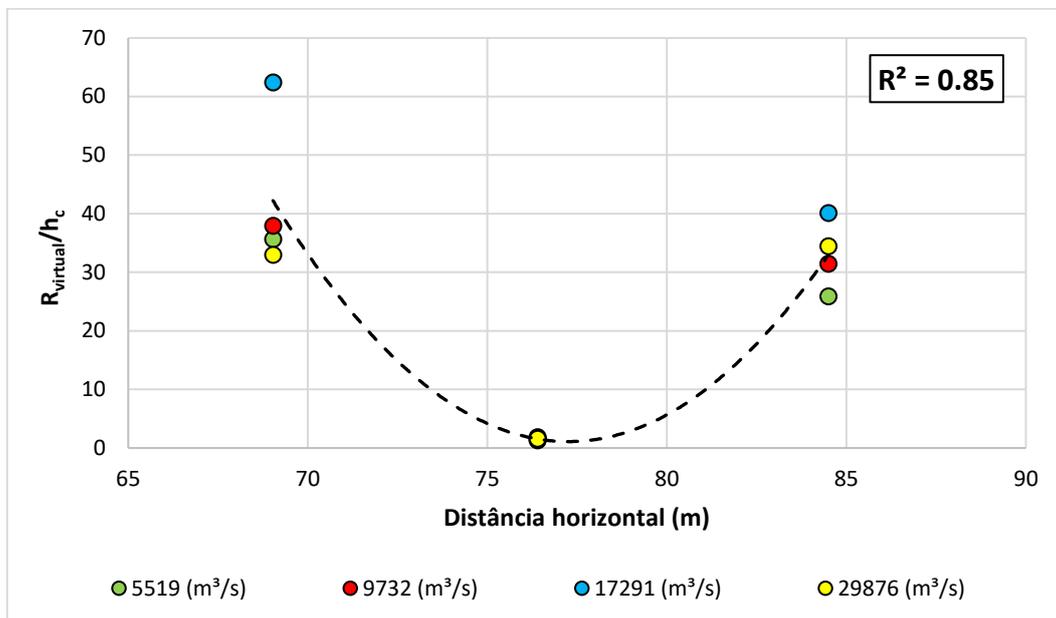


Figura 40. Ajuste realizado para o trecho 4 da análise de pressão média associada ao escoamento livre.

Na aplicação da teoria de curvas verticais empregada neste trecho do sistema extravasor, em todas as tomadas se adotou sinal positivo para o fator de correção da pressão. Além disso, de forma análoga ao trecho 2, destaca-se, de forma positiva, que os menores valores de $R_{virtual}$, são observados na tomada T14, estando condizente com o esperado e com a realidade do fenômeno.

A equação representativa do ajuste exibido na Figura 40 é apresentada a seguir, na Equação 35.

$$\frac{R_{virtual}}{h_c} = (0,6076X^2 - 93,882X + 3627,6) \quad \text{Equação 35}$$

5.2.2.2. Ressalto hidráulico

A análise dos dados relacionados à parcela de pressão média associada à formação do ressalto hidráulico levou à divisão do sistema extravasor em dois trechos. Além disso, o processamento destas informações tornou necessária a proposição, também, de uma metodologia para estimar a posição de início do ressalto. Os ajustes e equacionamentos relacionados aos itens supracitados são expostos nos subtópicos subsequentes.

5.2.2.2.1. Trecho 1

Diferentemente do apresentado nas divisões por trechos adotadas na análise dos dados de $h_{méd}$ e $P_{méd}$ (EL), nos ajustes elaborados para a $P_{méd}$ (RH) houve uma diferença de referencial para a distância horizontal. Como se pode visualizar no gráfico de ajuste exibido na Figura 41, com coeficiente de determinação igual a 0,97, a origem do eixo das abscissas refere-se, neste caso, à posição onde $X-X_1$ é igual a zero, ou seja, a posição de início do ressalto. Para posições onde a diferença $X-X_1$ resulta em valores negativos, ou seja, antes da posição de início do ressalto, a parcela $P_{méd}$ (RH), presente no eixo das ordenadas, é nula, visto que a carga de pressão medida é completamente associada à $P_{méd}$ (EL). Desta forma, conforme detalhado na metodologia, o trecho 1 é delimitado entre a tomada de início do ressalto hidráulico e a tomada T13.

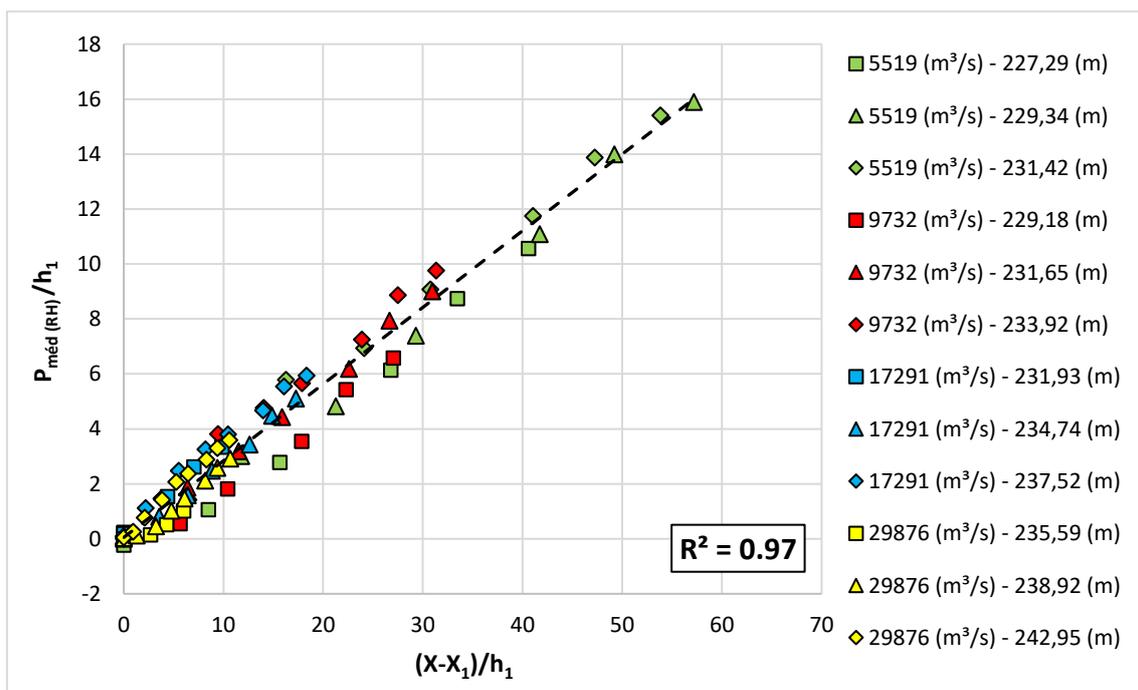


Figura 41. Ajuste realizado para o trecho 1 da análise de pressão média associada ao ressalto hidráulico.

A partir do gráfico exibido, fica evidente o efeito satisfatório da incorporação dos parâmetros X_1 e h_1 nos processos de adimensionalização realizados. Além disso, se percebe que os adimensionais propostos proveram um excelente agrupamento das $P_{méd}$ (RH), independentemente do nível de água a jusante, ou nível de submergência.

O equacionamento associado ao ajuste da $P_{\text{méd (RH)}}$ no trecho 1 é exibido na Equação 36.

$$\frac{P_{\text{méd (RH)}}}{h_1} = 0,2789 \left(\frac{X - X_1}{h_1} \right) + 0,0519 \quad \text{Equação 36}$$

5.2.2.2.2. Trecho 2

Os adimensionais usados para agrupar os dados de $P_{\text{méd (RH)}}$ no trecho 2 são exatamente os mesmos empregados para o trecho 1. Desta forma, novamente, observa-se que a origem do eixo das abscissas está condicionada à posição de início de ressalto para cada condição ensaiada. Além das similaridades listadas, diferentemente do trecho 1, no trecho 2 são apresentados sempre os dados referentes às tomadas T14 e T15.

Ainda, como pode-se notar na Figura 42, o ajuste aplicado aos dados também difere do trecho 1, visto que, mesmo com as mesmas adimensionalizações, o comportamento dos dados não é semelhante. Como possível justificativa do comportamento observado, destaca-se que o trecho 1, embora possua mudanças de inclinação, se apresenta sempre em declive, enquanto o trecho 2 representa o segmento em auge da soleira terminal.

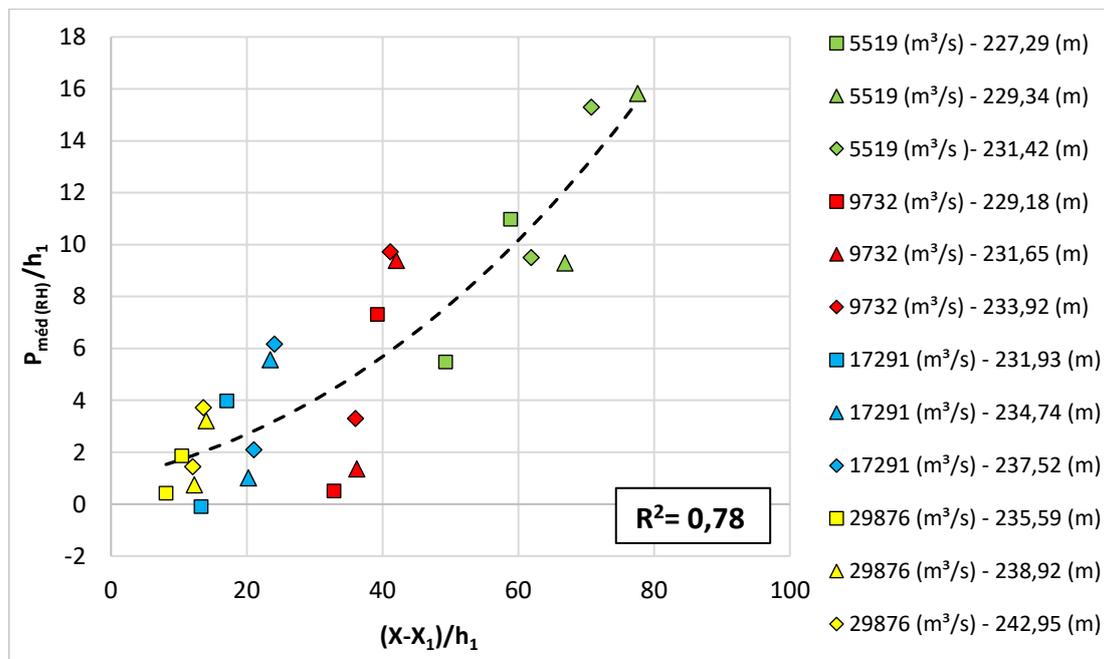


Figura 42. Ajuste realizado para o trecho 2 da análise de pressão média associada ao ressalto hidráulico.

Ao observar a figura apresentada, é evidente que há uma maior dispersão dos dados plotados em comparação ao trecho 1, o que resulta na diminuição do coeficiente R^2 . Além disso, percebe-se que as maiores dispersões ocorreram nas vazões de 9732 e 17291 m^3/s .

O equacionamento referente ao ajuste da $P_{méd (RH)}$ no trecho 2 é apresentado, a seguir, na Equação 37

$$\frac{P_{méd (RH)}}{h_1} = 4,44 \times 10^{-5} \left(\frac{X - X_1}{h_1} + 42,121 \right)^{2,6676} \quad \text{Equação 37}$$

5.2.2.2.3. Posição de início do ressalto

A determinação, aproximada, da posição de início do ressalto fez-se necessária para viabilizar a aplicação do método proposto para obtenção das $P_{méd (RH)}$, tanto no trecho 1, quanto no trecho 2. De posse do parâmetro X_1 , também é possível estimar a altura conjugada rápida, utilizando os equacionamentos estabelecidos para determinar a lâmina d'água média em cada posição do sistema extravasor. O ajuste escolhido para a determinação de X_1 está representado na Figura 43, com um coeficiente R^2 de 0,95, indicando boa representatividade frente aos dados.

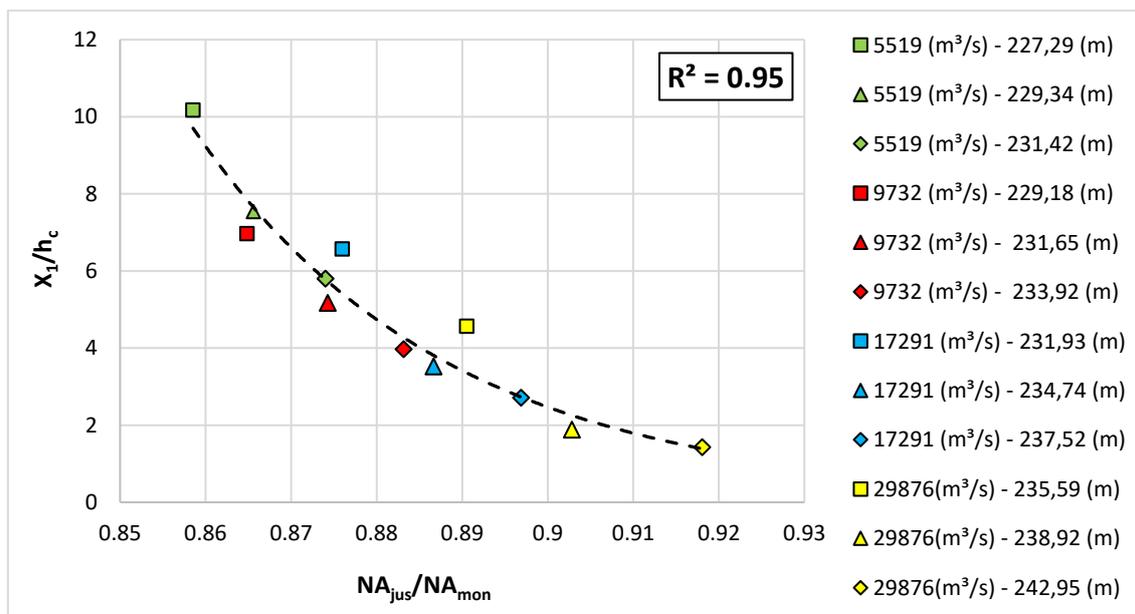


Figura 43. Ajuste realizado para a determinação, aproximada, da posição de início do ressalto hidráulico.

A partir da Figura 43 é notável o bom agrupamento das informações plotadas, o que demonstra claramente a influência da vazão e do nível de jusante sobre a posição de início do ressalto. Neste caso, mais uma vez, a influência da vazão foi representada, principalmente, pelo parâmetro de altura crítica, embora também haja relação prática com o nível de jusante, a ser determinado por uma curva-chave.

Salienta-se que o valor do parâmetro X_1 possui como referência inicial a crista do vertedouro. A equação associada ao ajuste apresentado na Figura 43 é exibida, a seguir, na Equação 38.

$$\frac{X_1}{h_c} = 0,1163 \left(\frac{NA_{jus}}{NA_{mon}} \right)^{-29,0081} \quad \text{Equação 38}$$

5.3 METODOLOGIA PROPOSTA PARA PREVISÃO DE PRESSÕES MÉDIAS – RESUMO

A metodologia desenvolvida neste estudo para determinar as pressões médias atuantes sobre o sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó envolve a utilização de diversas equações, apresentadas nos tópicos anteriores. Visando simplificar a aplicação da metodologia, a seguir, é apresentada a Tabela 7, agrupando, de forma resumida, todos os equacionamentos obtidos por meio dos ajustes.

Tabela 7. Resumo das equações de aplicação da metodologia proposta.

Trecho de validade	Equação	Referência	R ²
Lâmina d'água média			
1	$\frac{h_{méd}}{Ab} = 0,7874(X - 5,5302)^{-0,1654}$	Equação 30	0,92
2	$h_{méd} = 0,9183h_n^{1,3402}$	Equação 31	0,9968
Pressão média – escoamento livre			
1	$P_{méd(EL)} = 0,0711X^2 - 1,9337X + 11,8339$	Equação 32	0,92
2	$\frac{R_{virtual}}{h_c} = \frac{1}{(-1,7824 + 0,1339X - 0,00215X^2)}$	Equação 33	0,82
3	$\frac{P_{méd(EL)}}{h_c} = (0,000483X^2) - (0,06085X) + 2,1839$	Equação 34	0,77

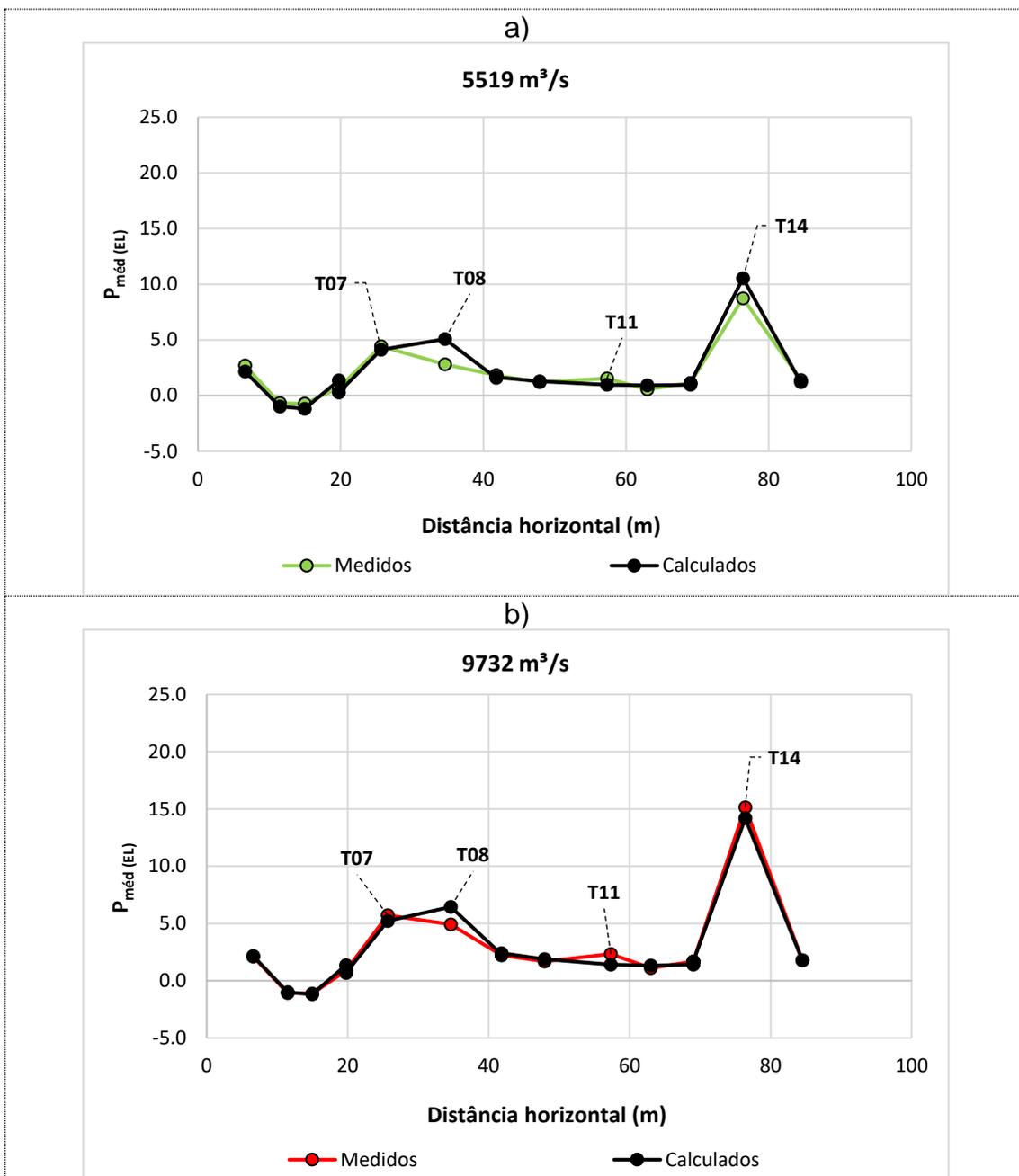
4	$\frac{Raio}{h_c} = (0,6076X^2 - 93,882X + 3627,6)$	Equação 35	0,85
Pressão média – Ressalto hidráulico			
1	$\frac{P_{méd(RH)}}{h_1} = 0,2789 \left(\frac{X - X_1}{h_1} \right) + 0,0519$	Equação 36	0,97
2	$\frac{P_{méd(RH)}}{h_1} = 4,44 \times 10^{-5} \left(\frac{X - X_1}{h_1} + 42,121 \right)^{2,6676}$	Equação 37	0,78
Posição de início do ressalto hidráulico			
-	$\frac{X_1}{h_c} = 0,1163 \left(\frac{NA_{jus}}{NA_{mon}} \right)^{-29,0081}$	Equação 38	0,95

5.4 APLICAÇÃO

Visando avaliar de forma prática a qualidade dos resultados propiciados pela metodologia proposta para previsão das pressões médias, o conjunto de equações exibidos na Tabela 6 foi aplicado para as condições ensaiadas. A partir desta aplicação, foi possível visualizar, de forma comparativa, os resultados estimados frente aos valores brutos medidos experimentalmente. Nos subitens seguintes são explanados os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia para a obtenção das $P_{méd(EL)}$, $P_{méd(RH)}$ e $P_{méd(total)}$. Cabe salientar, nos resultados, a repetição das tomadas T06, T09 e T13, tratando-se de pontos de delimitação entre trechos e que são comuns a mais de um ajuste.

5.4.1. escoamento livre

Os dados obtidos para a parcela de pressão média proveniente do escoamento livre são apresentados na Figura 44, para as quatro vazões ensaiadas (a até d). Nos gráficos, os valores obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta encontram-se denominados como “Calculados” e foram plotados juntamente dos dados medidos nos ensaios, para análise comparativa.



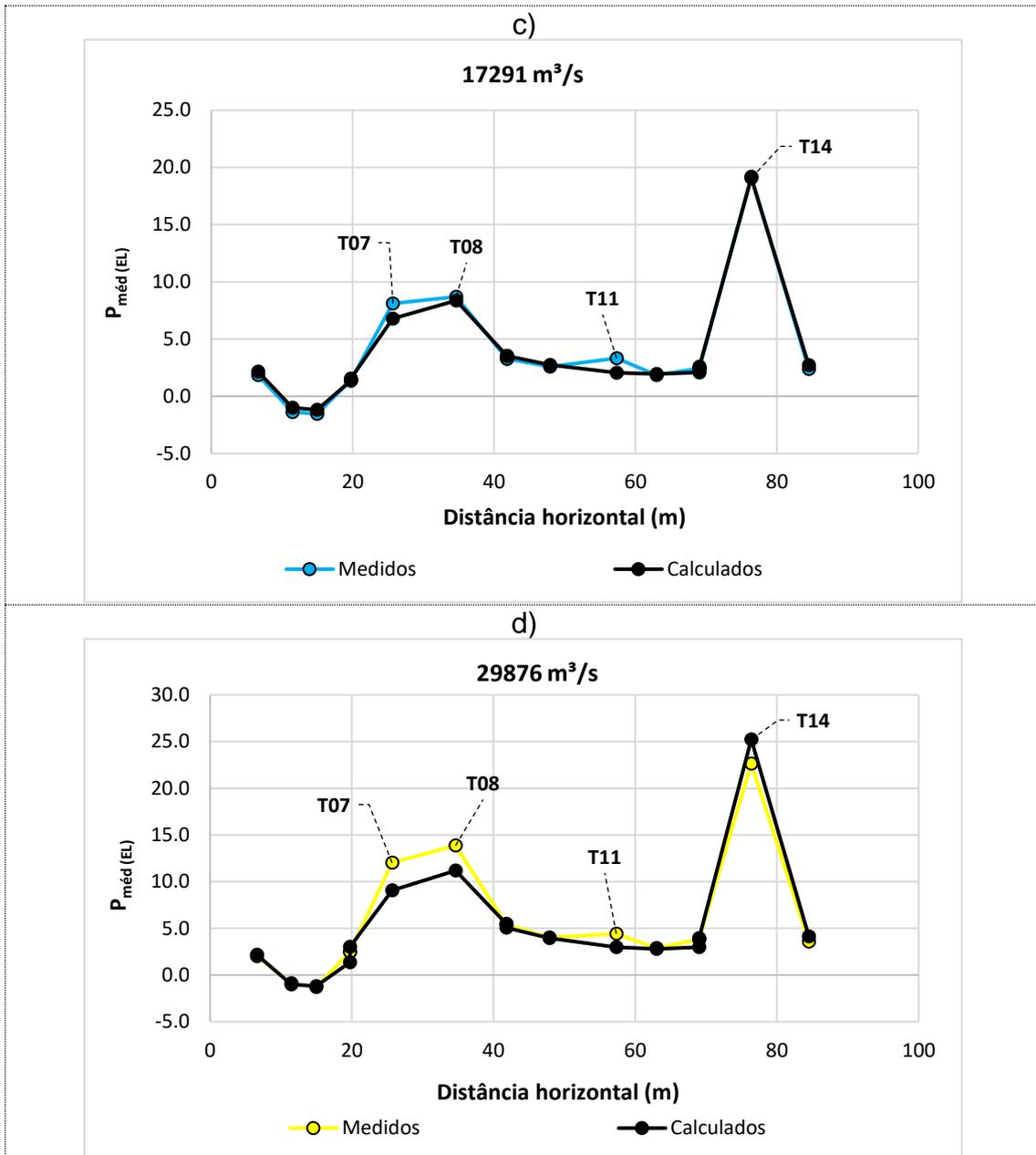


Figura 44. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do escoamento livre.

Ao analisar os gráficos apresentados, observa-se, inicialmente, um comportamento semelhante das duas séries de dados, para todas as vazões. De forma geral, a metodologia desenvolvida demonstrou bons resultados na determinação da $P_{méd}$ (EL), com erros inferiores a 1 m.c.a. na maioria das tomadas. Para todas as vazões, os resultados obtidos a partir do ajuste empregado ao trecho 1 apresentou resultados significativamente satisfatórios.

No que diz respeito às tomadas que mostraram as maiores discrepâncias nas estimativas, destacam-se a T07, T08, T11 e T14. Com relação às tomadas

T07 e T08, estas fazem parte do ajuste realizado para o trecho 2, localizado na curva de concordância entre a soleira Creager e a bacia de dissipação. Por sua vez, a tomada T14 está localizada no trecho 4, na região do vértice entre a bacia de dissipação inclinada e a soleira terminal. Entre as causas predominantes que levam à observação mencionada, evidencia-se a sobreposição de erros na determinação do R_{virtual} e $h_{\text{méd}}$, englobados de forma conjunta na teoria de pressões em curvas verticais. Além disso, é crucial ressaltar que, nas tomadas centrais das curvas verticais, os erros na determinação do R_{virtual} , mesmo quando pequenos, podem prover impactos significativos no cálculo do fator de correção da pressão.

Quanto à tomada T11, esta, pertence ao trecho 3 de análise, no entanto, como mencionado anteriormente, apresentou resultados superestimados e foi descartada do processo de ajuste dos dados. Assim, entende-se como benéfica a subestimação das $P_{\text{méd (EL)}}$ neste ponto.

Dentre todas as tomadas e todas as vazões, as maiores diferenças foram observadas na vazão de 29876 m³/s, nas tomadas T07 (-2,95 m.c.a.), T08 (-2,67 m.c.a.) e T14 (+ 2,59 m.c.a.). Ainda, na tomada T08, para a vazão de 5519 m³/s, observou-se, também, uma diferença mais significativa, de + 2,25 m.c.a.

Como se pode notar ao longo do trabalho, para as tomadas de transição entre trechos (T06, T09 e T13), os dados de $P_{\text{méd (EL)}}$ foram levados em conta nos ajustes a montante e a jusante. Por exemplo, as $P_{\text{méd (EL)}}$ da tomada T09 foram ajustados tanto no trecho 2, quanto no trecho 3. Observando os resultados obtidos para esta parcela de pressão, percebe-se que os valores encontrados apresentam uma pequena divergência. Assim, visando a melhora dos resultados derivados da aplicação da metodologia proposta, nestes pontos, recomenda-se calcular a $P_{\text{méd (EL)}}$ usando ambos os equacionamentos e adotar a média entre eles como resultado final.

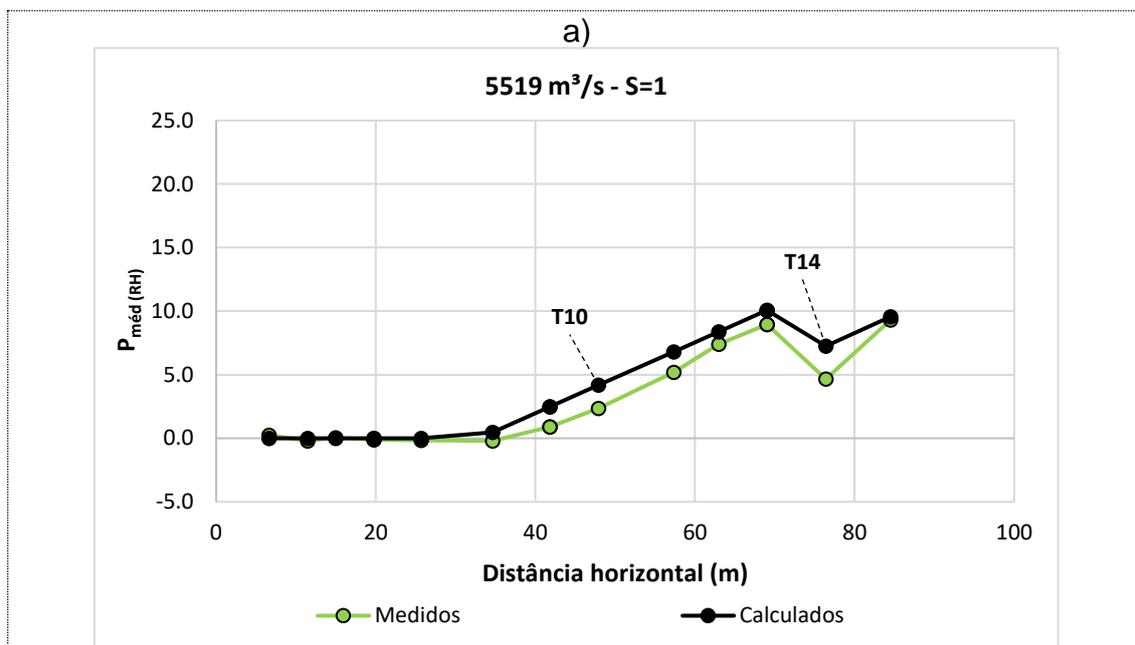
5.4.2. Ressalto hidráulico

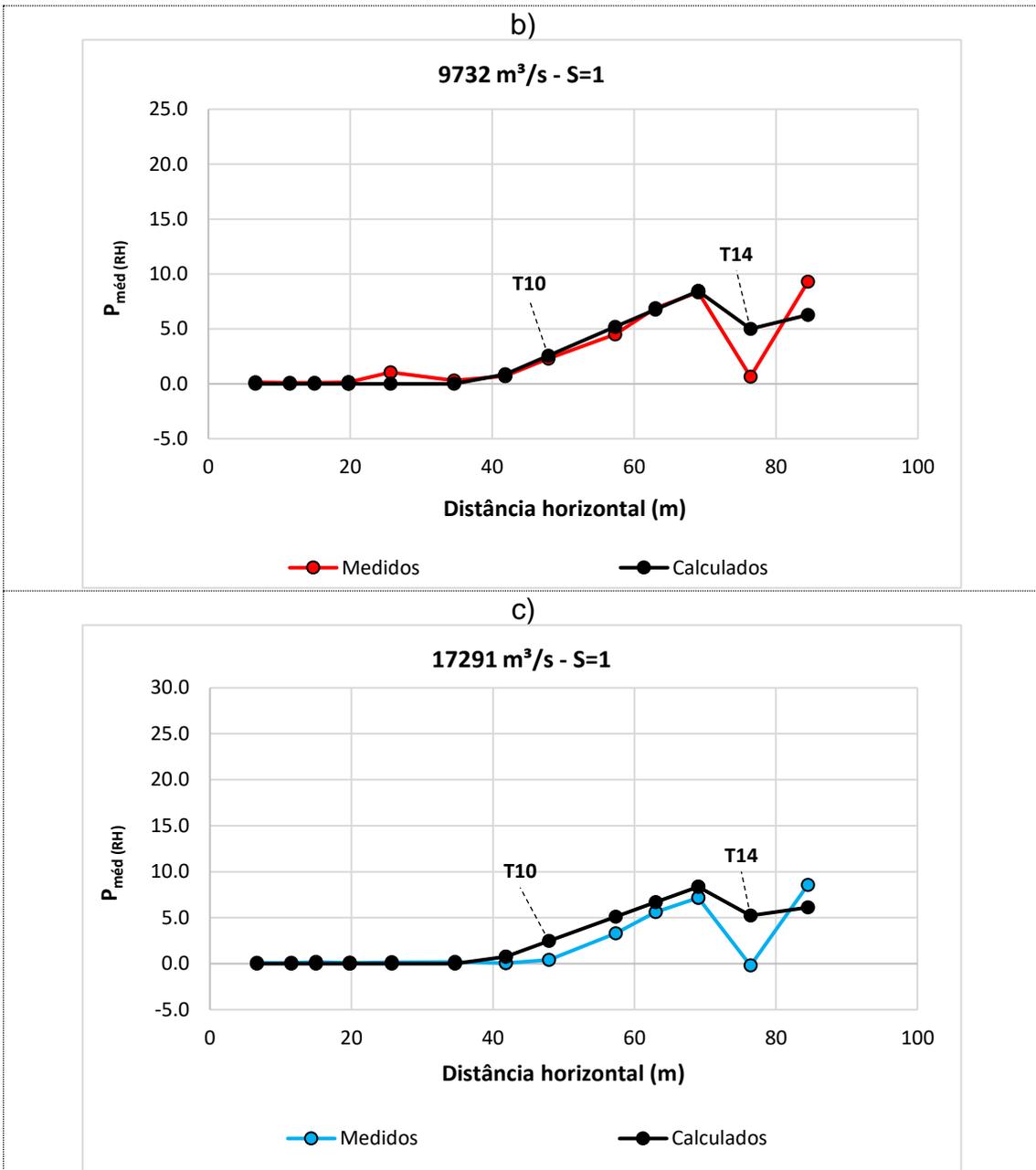
Os dados obtidos para a parcela de pressão média referente à formação do ressalto hidráulico, diferentemente da parcela de escoamento livre, são provenientes de três condições de ensaio para cada vazão. Portanto, nos próximos subtópicos, os resultados da aplicação da metodologia proposta são

apresentados com base nos diferentes graus de submergência, ou seja, $S=1$, $S=1,2$ e $S=1,4$.

5.4.2.1. Submergência $S=1$

A condição de submergência estabelecida como $S=1$, condiz, para cada uma das vazões, à situação operacional atual do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó. Nesse contexto, o nível de jusante adotado é determinado a partir de uma curva-chave ajustada para o local. Os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia, nesta condição de ensaio, são exibidos, a seguir, na Figura 45.





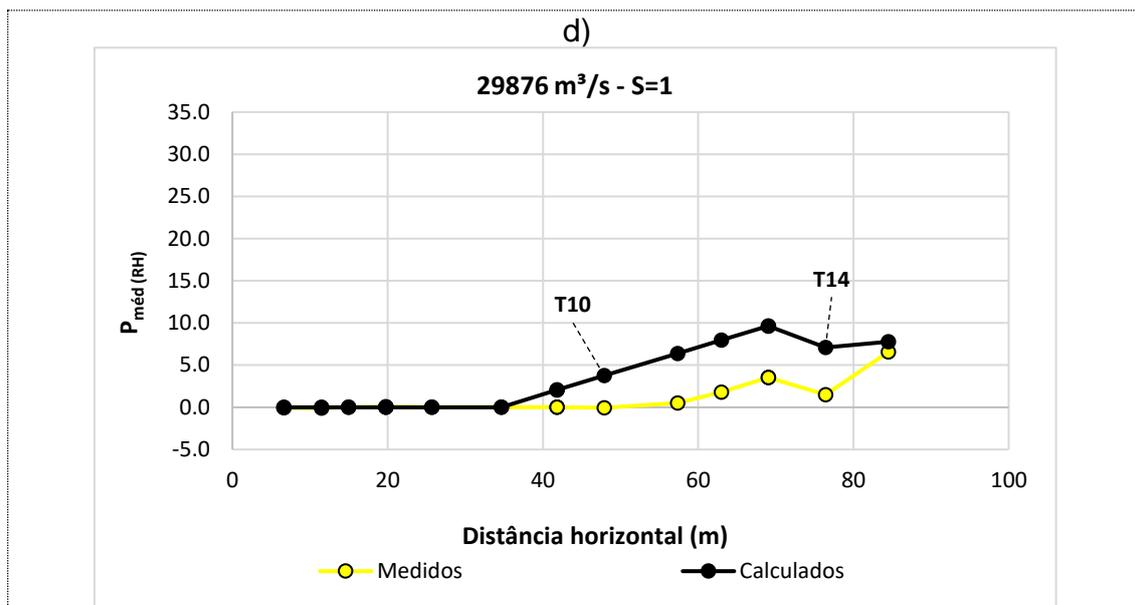


Figura 45. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, para a condição operacional.

A observação dos gráficos apresentados permite, de forma inicial, a percepção de um desenvolvimento similar entre as séries plotadas, ao longo do sistema extravasor. Em geral, na maioria das situações, os erros foram inferiores a 2 m.c.a., principalmente nas menores vazões. Entretanto, em algumas tomadas e para determinadas vazões, houve discrepâncias entre os valores.

Partindo do princípio de que $P_{\text{méd (RH)}}$ refere-se exclusivamente à contribuição do ressalto hidráulico na carga de pressão local, percebe-se, claramente, que ambas as séries de dados começam a elevar-se, partindo de zero, a partir da posição de início de ressalto. Portanto, é importante destacar que os equacionamentos propostos para determinar $P_{\text{méd (RH)}}$ devem ser aplicados apenas a partir de X_1 .

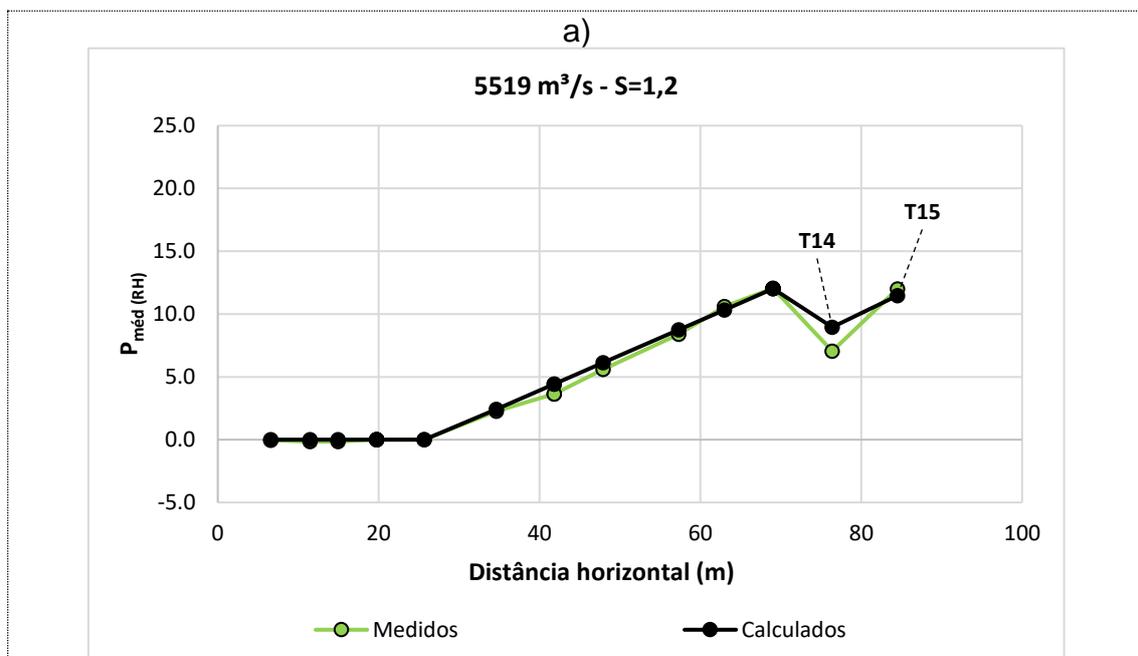
Com relação às discrepâncias mencionadas, nota-se, de modo geral, que, para a condição de submersão $S=1$, a metodologia proposta tende a superestimar os valores de pressão média na maioria das situações. As maiores diferenças foram notadas na vazão de 29876 m³/s, entre as tomadas T10 e T14, estando entre 3,80 e 6,16 m.c.a. Além disso, a tomada T14 apresentou diferenças acima de 2 m.c.a. para todas as vazões.

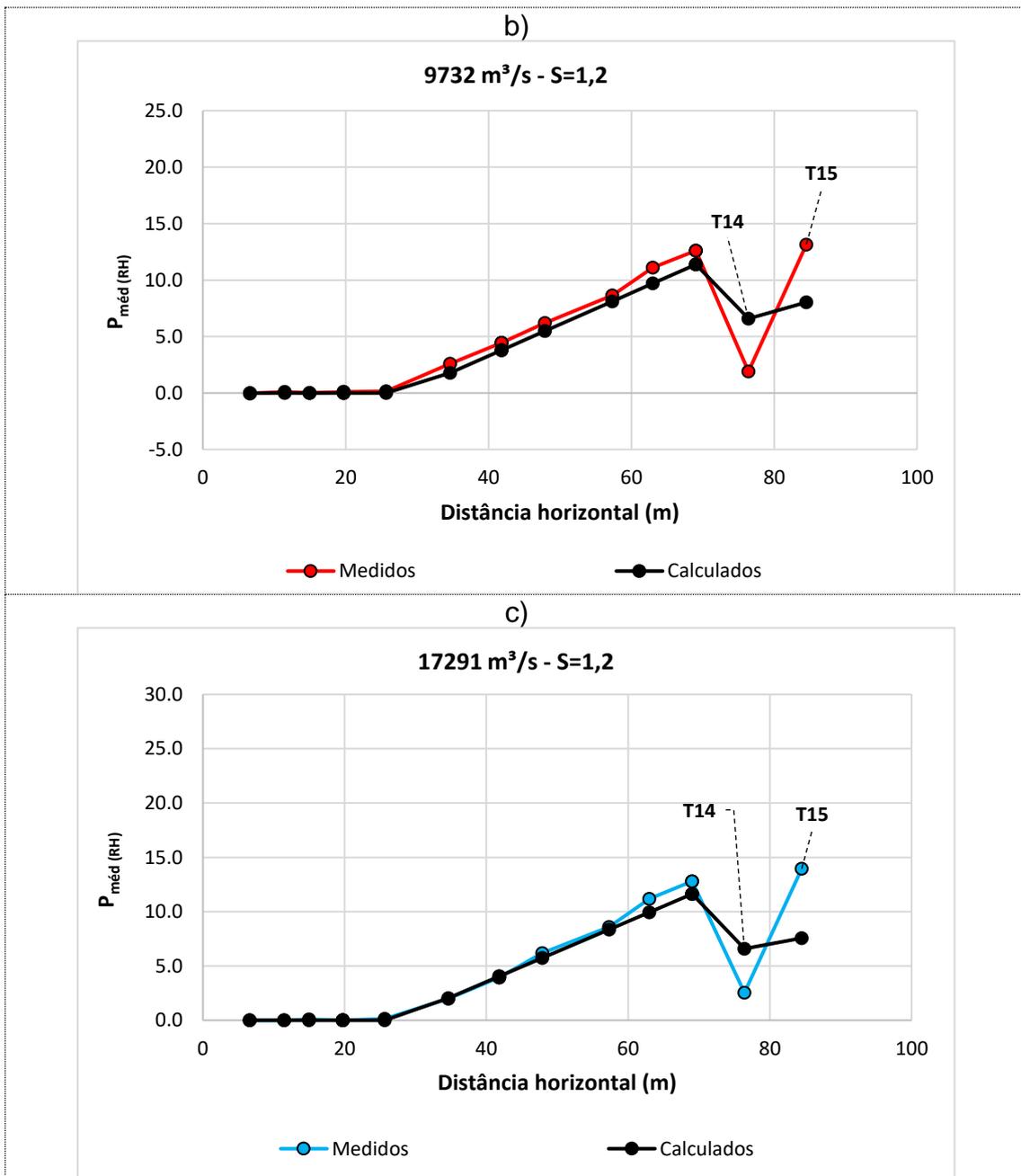
Salienta-se que, embora as séries de dados apresentem tendência de desenvolvimento semelhante, inclusive para os demais cenários de submersão, o erro na determinação da posição de início de ressalto ocasiona

a defasagem da série calculada, contribuindo na magnitude dos erros obtidos por tomada. Como exemplo, cita-se as discrepâncias mencionadas, referentes à maior vazão, onde a maior diferença na determinação do parâmetro X_1 , coincidiu com os maiores erros, em módulo, nos resultados da parcela $P_{\text{méd}}(\text{RH})$.

5.4.2.2. Submergência $S=1,2$

A condição de submergência estabelecida como $S=1,2$, como mencionado na metodologia, corresponde ao acréscimo de 20% na lâmina d'água de jusante, proporcionando o maior afogamento do ressalto hidráulico, em comparação à condição operacional. Para este cenário, a aplicação da metodologia resultou nos dados apresentados, a seguir, na Figura 46.





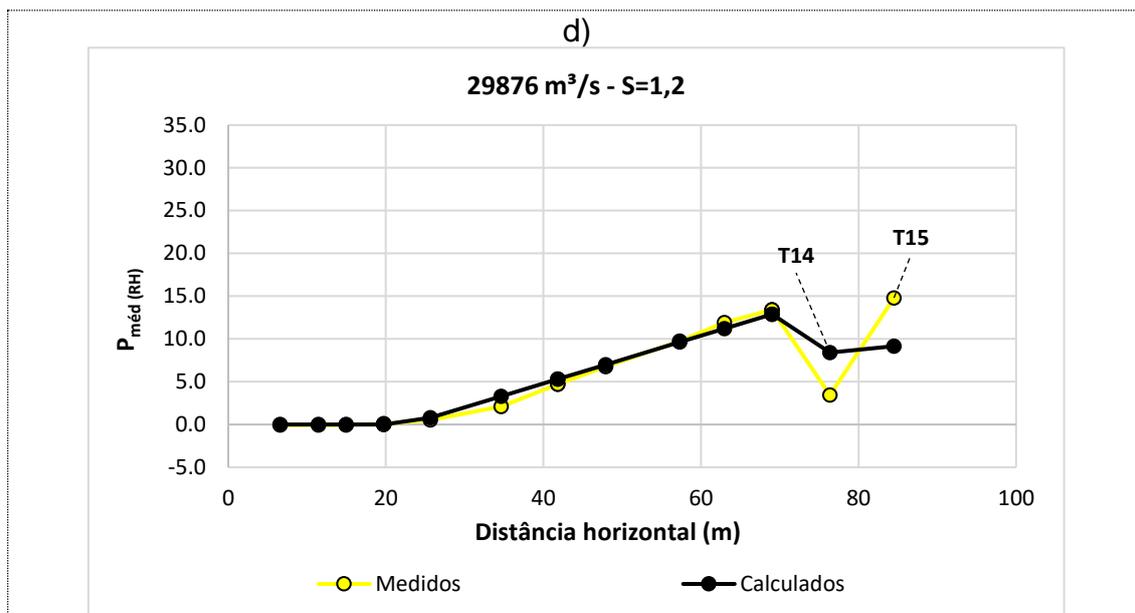


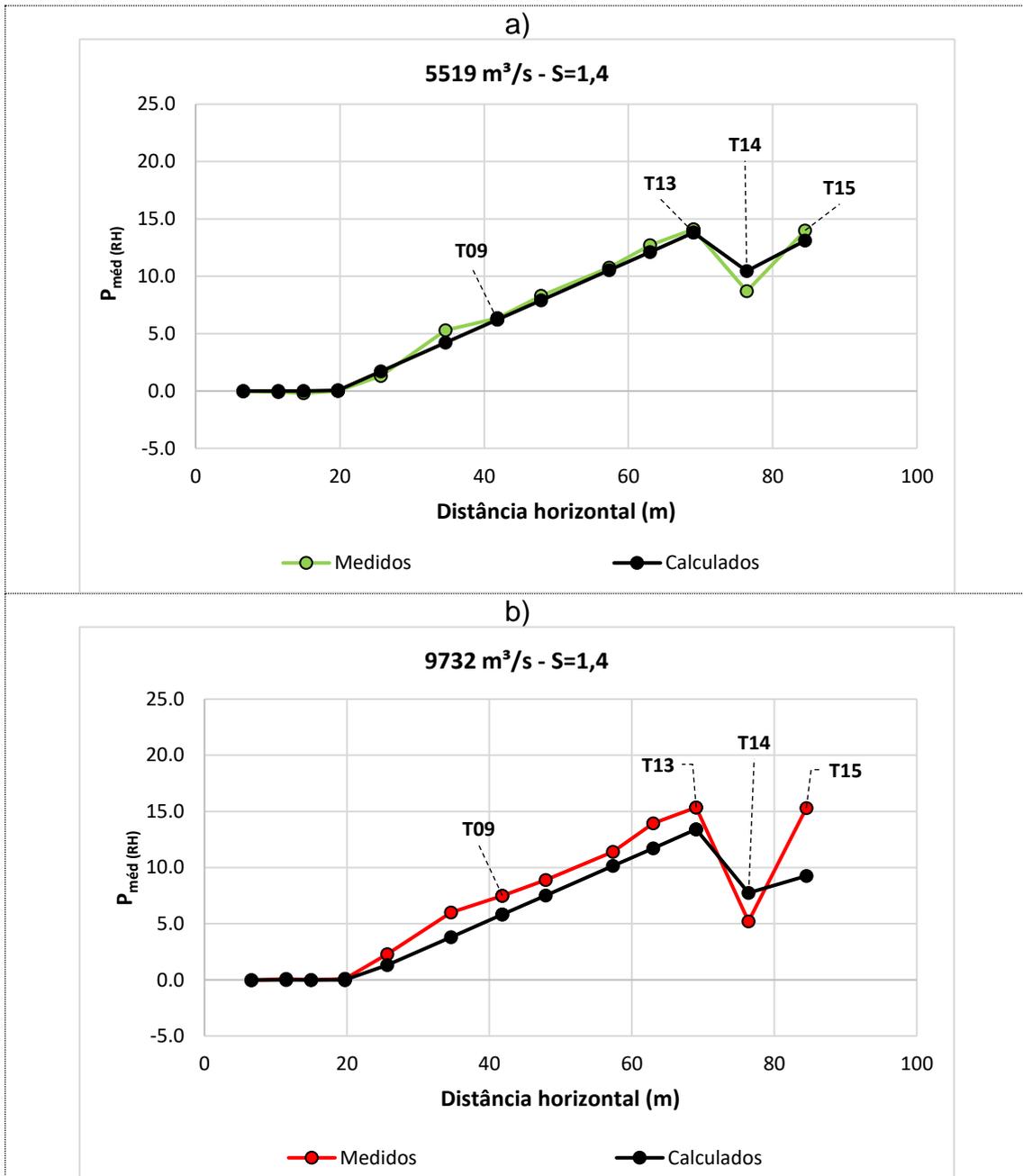
Figura 46. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, para a condição de $S=1,2$.

Ao observar os gráficos exibidos na Figura 46, é novamente evidente a semelhança entre os dados calculados e medidos ao longo do sistema extravasor. Contudo, analisando de forma comparativa à condição apresentada no subitem anterior, percebe-se a diminuição das diferenças obtidas para a $P_{méd}$ (RH).

Nesta condição de ensaio, as diferenças entre os valores, para a maioria dos casos, encontram-se inferiores à 2 m.c.a. Quanto às maiores divergências observadas, mais uma vez, foram notadas nas tomadas T14 e T15, com erros entre +1,90 e +4,94 m.c.a. e -0,53 e -6,39 m.c.a., respectivamente.

5.4.2.3. Submergência $S=1,4$

A condição de submergência definida com $S=1,4$ corresponde à situação de acréscimo de 40% na lâmina d'água de jusante da condição de operação do sistema extravasor. Em comparação às duas condições anteriores, esta associa-se a um afogamento ainda maior do ressalto hidráulico. Os resultados obtidos na aplicação da metodologia proposta, para esta condição de ensaio, encontram-se na Figura 47.



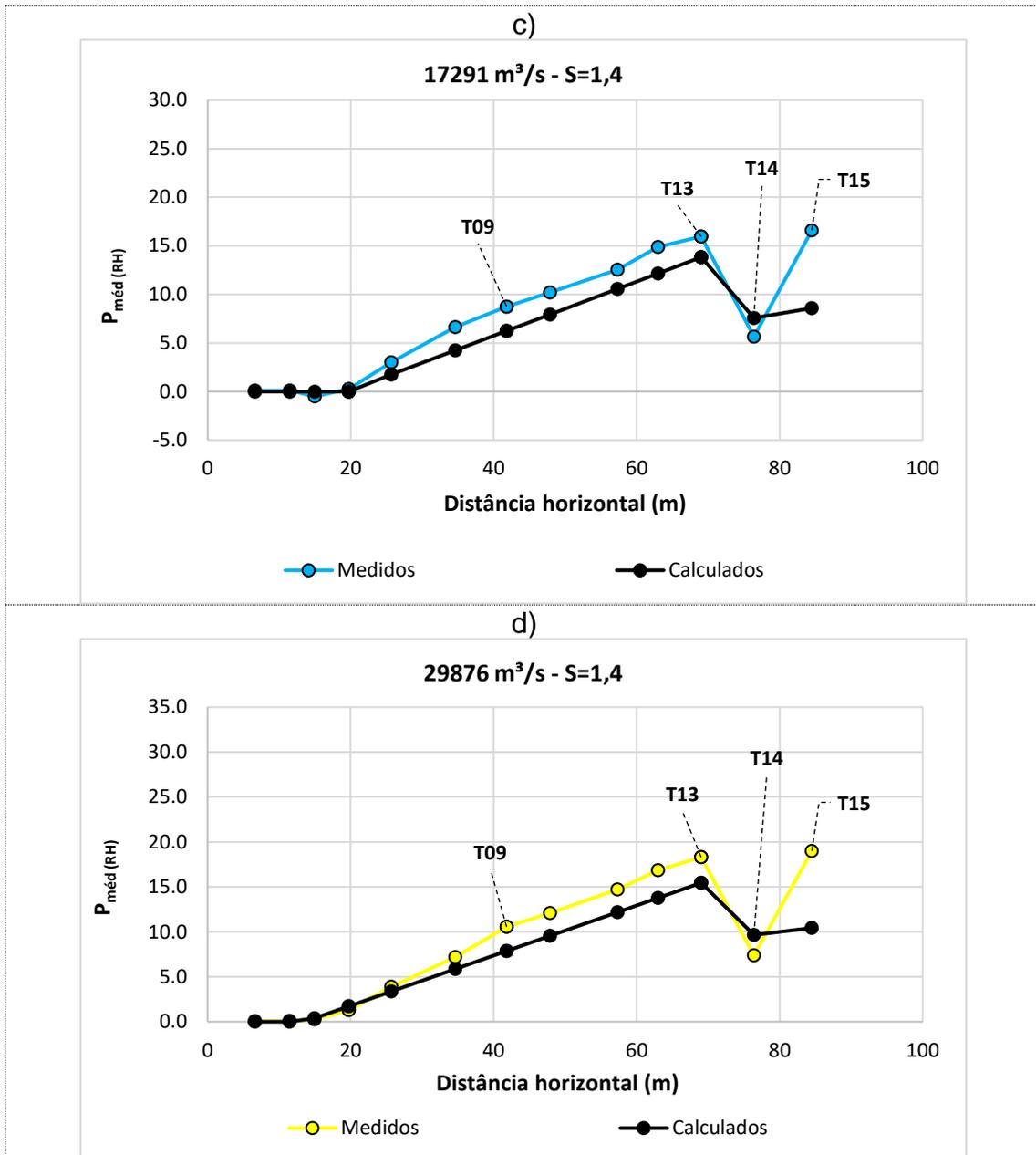


Figura 47. Resultados da aplicação da metodologia proposta na determinação da parcela de pressão média proveniente do ressalto hidráulico, para a condição de $S=1,4$.

Mais uma vez, como nas condições anteriores, pode-se observar, na Figura 47, que a tendência de distribuição dos dados de $P_{méd} (RH)$ para esta condição de ensaio foi bastante semelhante entre as séries medidas e calculadas. Contudo, tratando-se, neste caso, do maior grau de submergência ensaiado, é notável um maior afogamento do ressalto hidráulico com a antecipação da posição X_1 , quando comparada aos demais cenários. Essa constatação é facilmente demonstrada a partir da posição em que os dados de $P_{méd} (RH)$ começam a crescer.

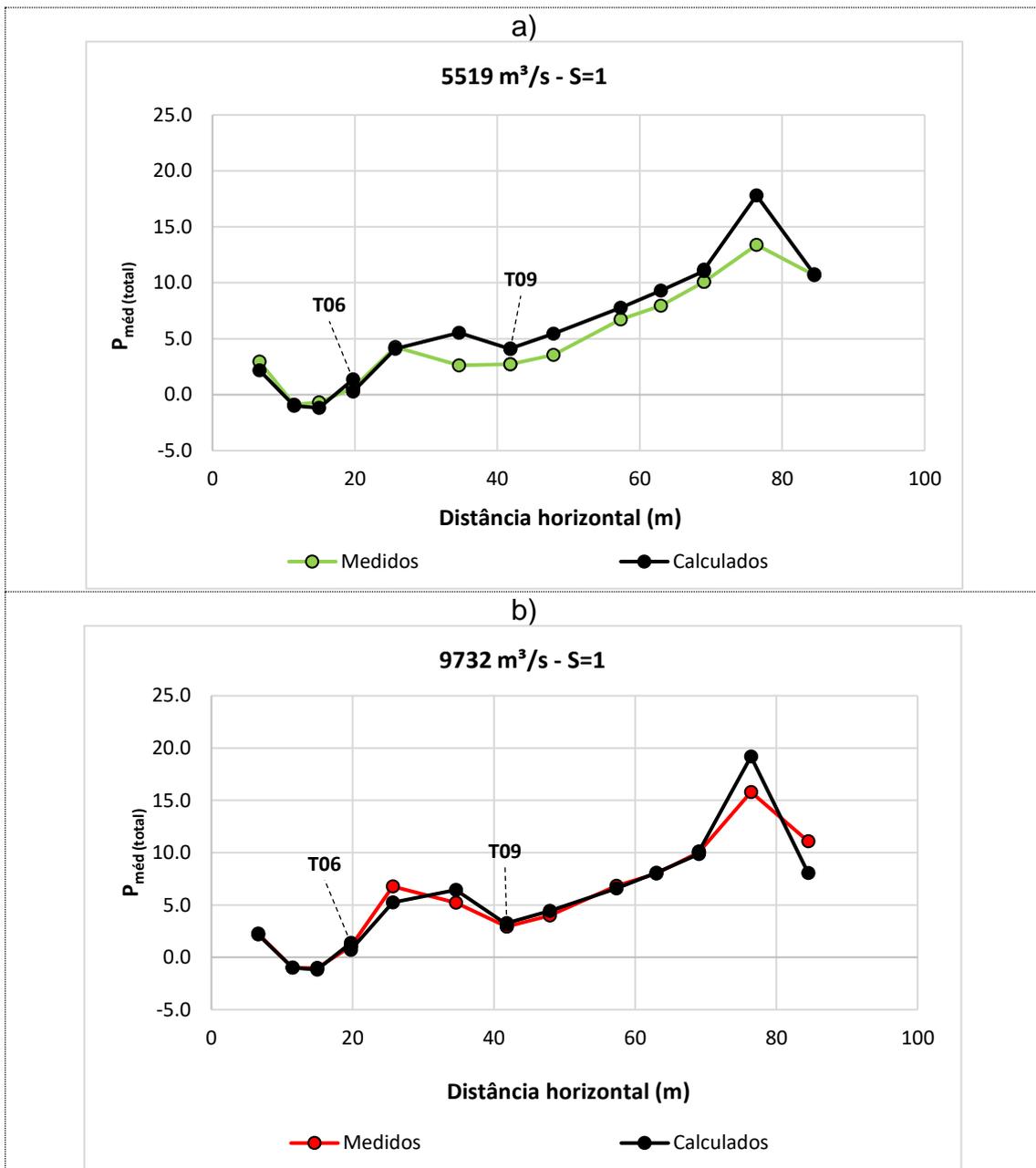
No que diz respeito aos erros resultantes da aplicação da metodologia, observa-se que esta tende a subestimar a parcela de pressão média, associada ao ressalto hidráulico, na maioria das tomadas e vazões analisadas, com exceção da tomada T14. Nas tomadas instaladas sobre a bacia de dissipação inclinada (T09 à T13) foram obtidos erros entre -1,98 e -3,08 m.c.a, para as duas maiores vazões. Para as menores, até a tomada T13, o menor erro observado foi de -2,19 m.c.a. Além dos locais supracitados, é perceptível que a maior discrepância entre as duas séries de dados, com exceção da menor vazão, ocorreu na tomada T15, com erros iguais ou, levemente, superiores a -8 m.c.a. nas maiores vazões.

5.4.3. Pressão média total e erros absolutos

Seguindo a abordagem apresentada na Equação 23, os resultados apresentados, aqui, como $P_{\text{méd (total)}}$, foram gerados a partir da soma das duas parcelas exibidas nos tópicos anteriores. Novamente, os resultados serão expostos a partir do grau de submergência, sendo divididos em três subtópicos. Além disso, neste item, que representa o principal resultado deste estudo, também serão apresentados, de forma gráfica, os erros absolutos finais

5.4.3.1. Submergência $S=1$

Para a condição de operação do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, os resultados obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta, para estimativa das pressões médias, encontram-se exibidos na Figura 48.



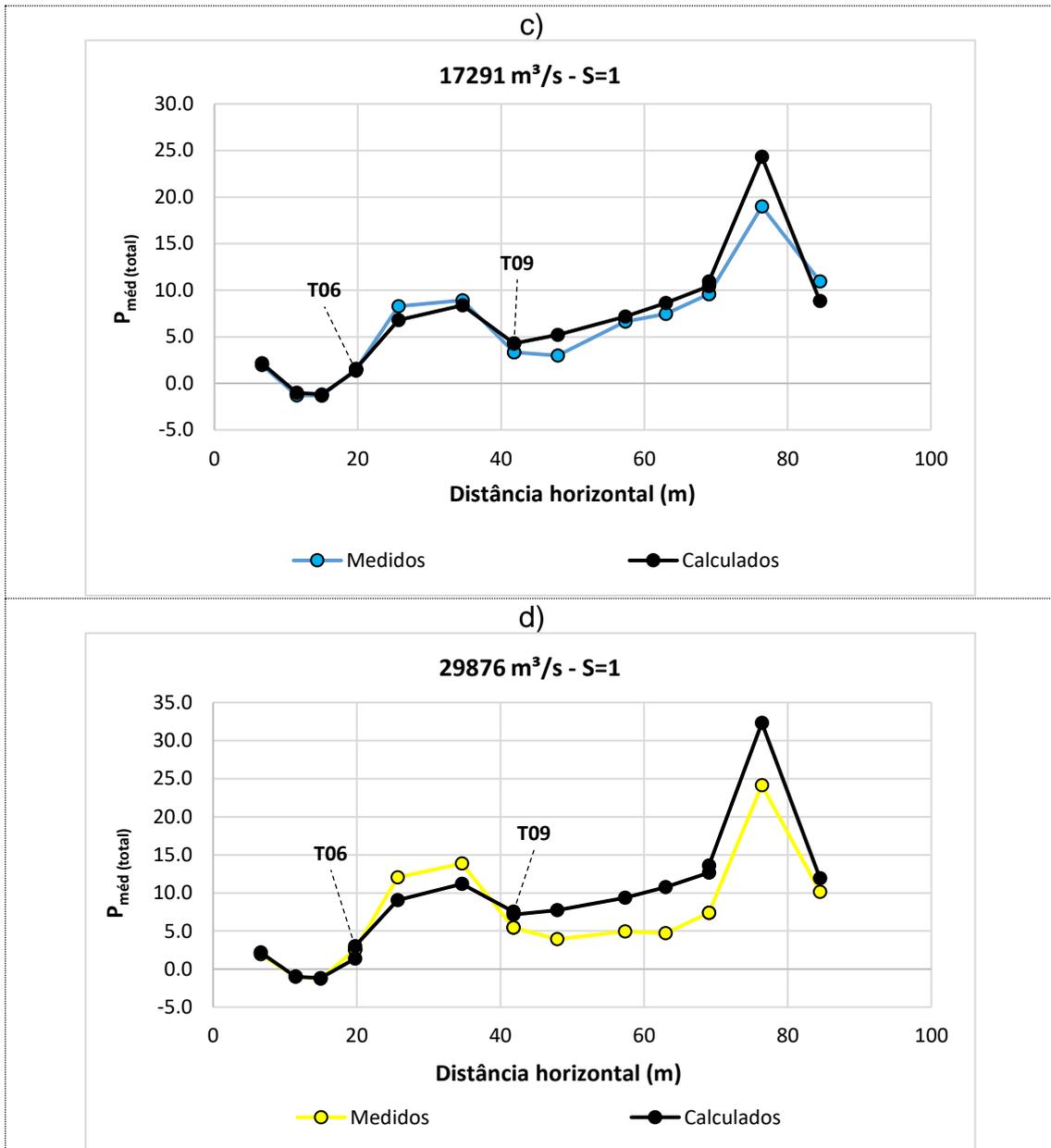


Figura 48. Resultados finais da aplicação da metodologia proposta em condições de operação.

A partir dos resultados finais, observa-se que a tendência de distribuição dos dados calculados se assemelha significativamente com a dos dados medidos, em todas as vazões. Contudo, na condição operacional, ao somar as parcelas de pressão média (EL e RH), nota-se uma inversão no sinal do erro entre as tomadas T06 e T09. Isso significa que, em uma parte do sistema extravasor, o modelo subestima as pressões médias atuantes, enquanto que na parte restante, superestima. Com o intuito de simplificar a visualização e avaliação das discrepâncias associadas à aplicação do modelo proposto, na

Figura 49 são exibidos os erros absolutos obtidos para cada tomada e cada vazão.

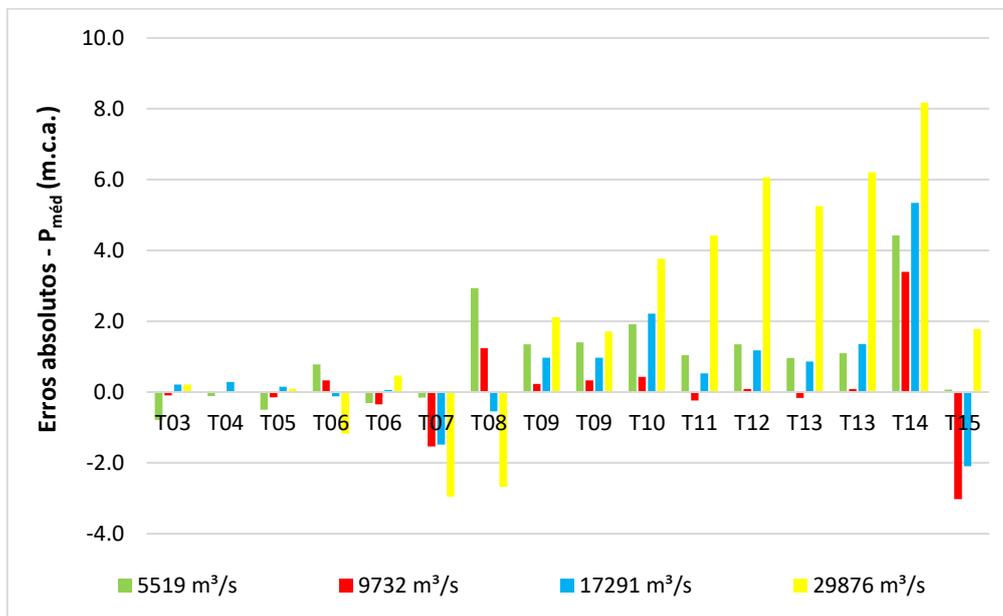


Figura 49. Representação gráfica dos erros absolutos obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para a condição operacional.

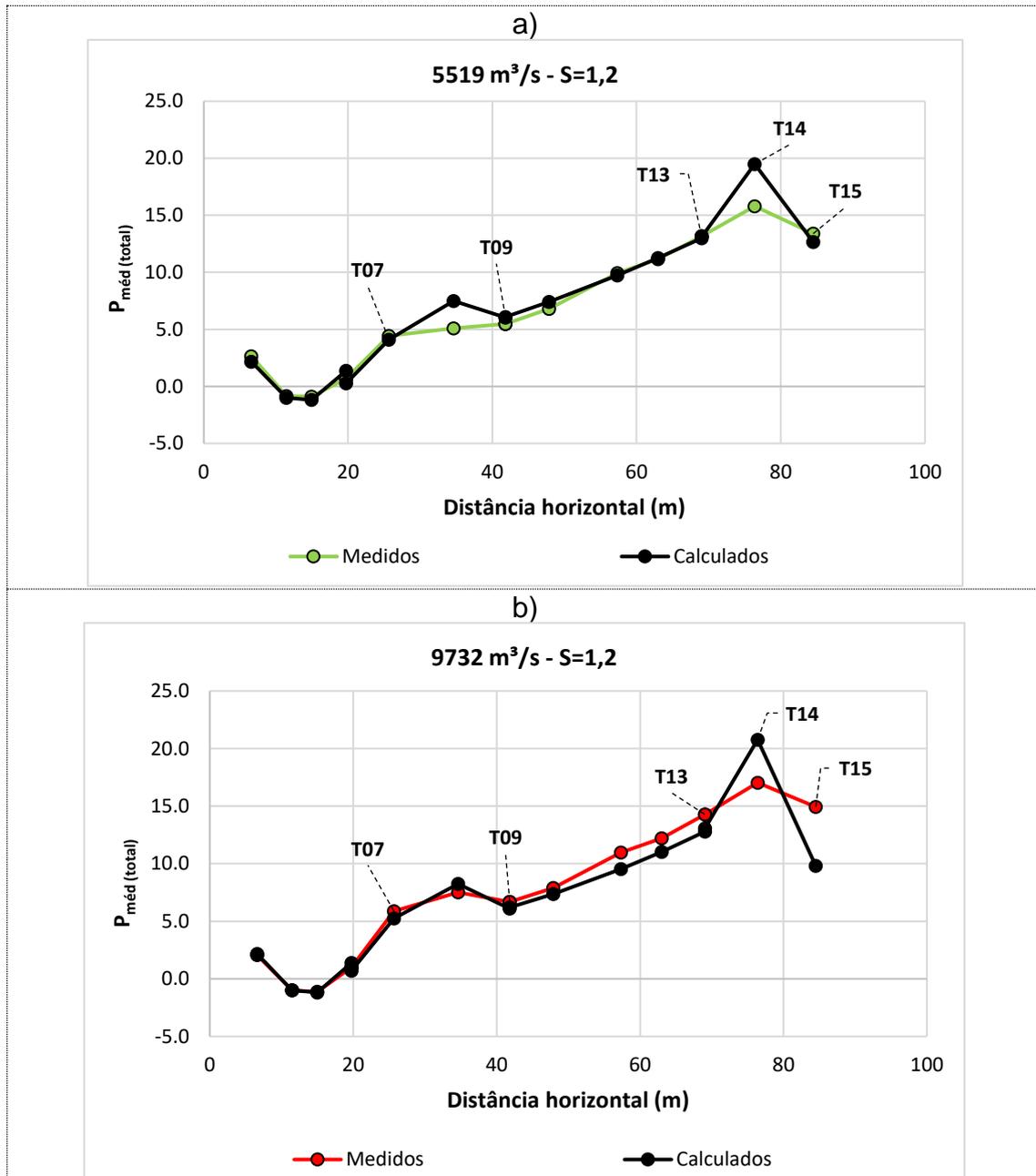
Entre as tomadas T03 e T13, cobrindo praticamente toda a extensão do vertedouro e da bacia de dissipação, nas três vazões mais baixas, a maioria dos erros absolutos teve um valor, em módulo, inferior a 2 m.c.a. Como exceções, citam-se a tomada T08 da vazão 5519 m³/s e T10 da vazão 17291 m³/s. De maneira oposta, na tomada T08 da vazão 5519 m³/s, a maior parte do erro é atribuída à parcela de escoamento livre, enquanto que na tomada T10 da vazão 17291 m³/s, o erro é predominantemente associado à parcela do ressalto hidráulico.

No trecho que abrange as tomadas T07 à T13, englobando a curva de concordância e a bacia de dissipação em declive, com exceção da tomada T09, todas as tomadas registraram erros absolutos, em módulo, iguais ou superiores a 2 m.c.a., na vazão de 29876 m³/s. Para a vazão mencionada, nos piores casos, tomadas T12 e T13, os erros ultrapassaram +6 m.c.a.

Além das questões já mencionadas, na tomada T14, os erros observados situam-se entre os valores de +3,39 e +8,17m.c.a. Com exceção da vazão de 9732 m³/s, a maior discrepância dos resultados deve-se à soma dos erros associados à determinação de $P_{méd}$ (EL) e $P_{méd}$ (RH).

5.4.3.2. Submergência $S=1,2$

Para a condição ensaiada com grau de submergência $S=1,2$, os resultados obtidos com o uso da metodologia proposta encontram-se exibidos na Figura 50.



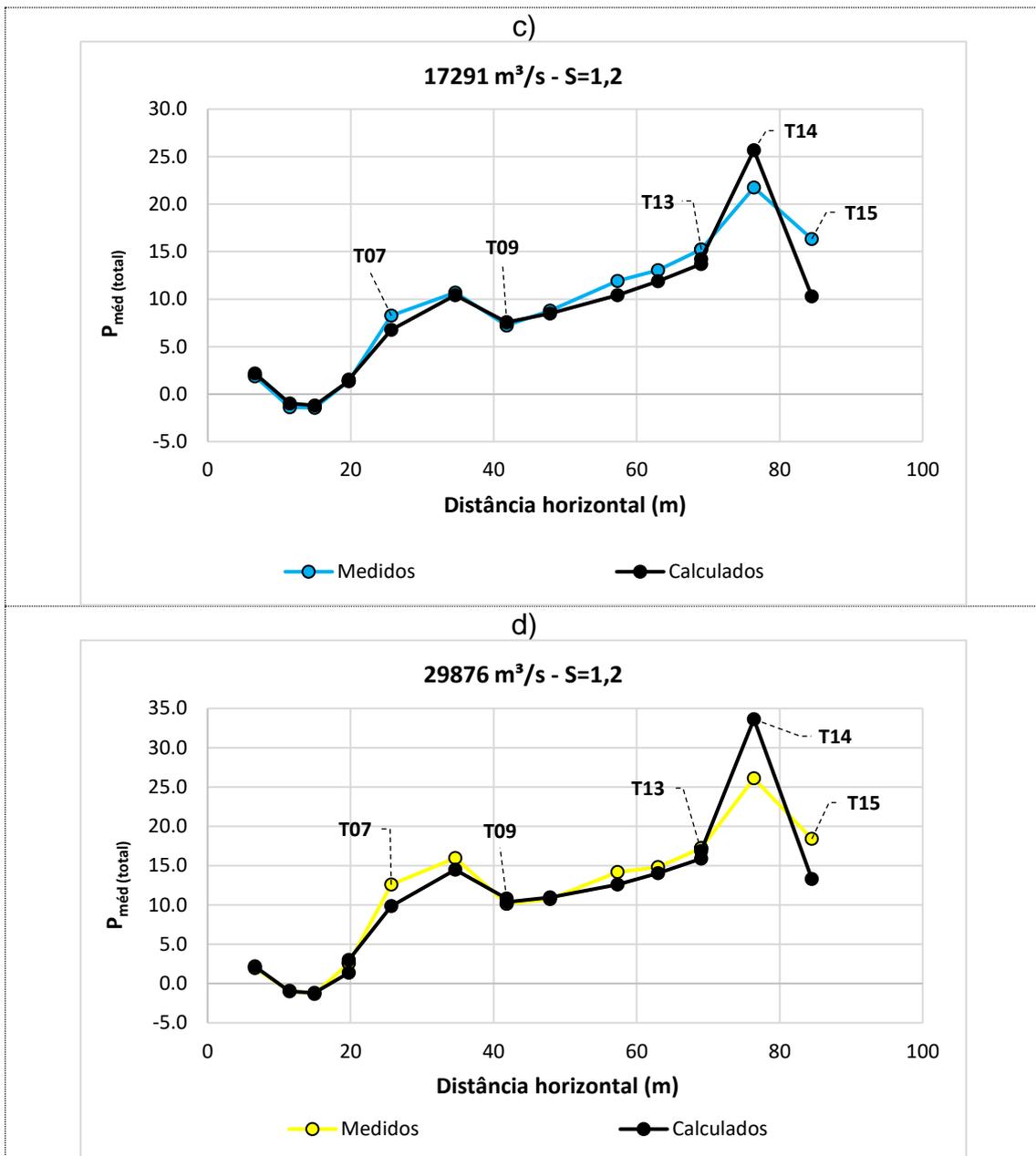


Figura 50. Resultados finais da aplicação da metodologia proposta em condições de $S=1,2$.

Mais uma vez, a partir dos resultados finais, observa-se que a tendência de distribuição das séries de dados calculados e medidos é similar para todas as vazões. Diferentemente da condição de submergência anterior, para todas as vazões há troca de sinal do erro absoluto entre as tomadas T13 e T15. Essa observação deve-se ao fato de que a metodologia superestima as pressões médias em T14, mas subestima em T13 e T15. Além disso, nota-se mudanças mais significativas de sinal entre as tomadas T07 e T09 para a vazão de 9732 m³/s. Com o intuito de simplificar a visualização e avaliação das discrepâncias

associadas à aplicação do modelo proposto, novamente, os erros absolutos obtidos, para cada tomada e cada vazão, são apresentados na Figura 51.

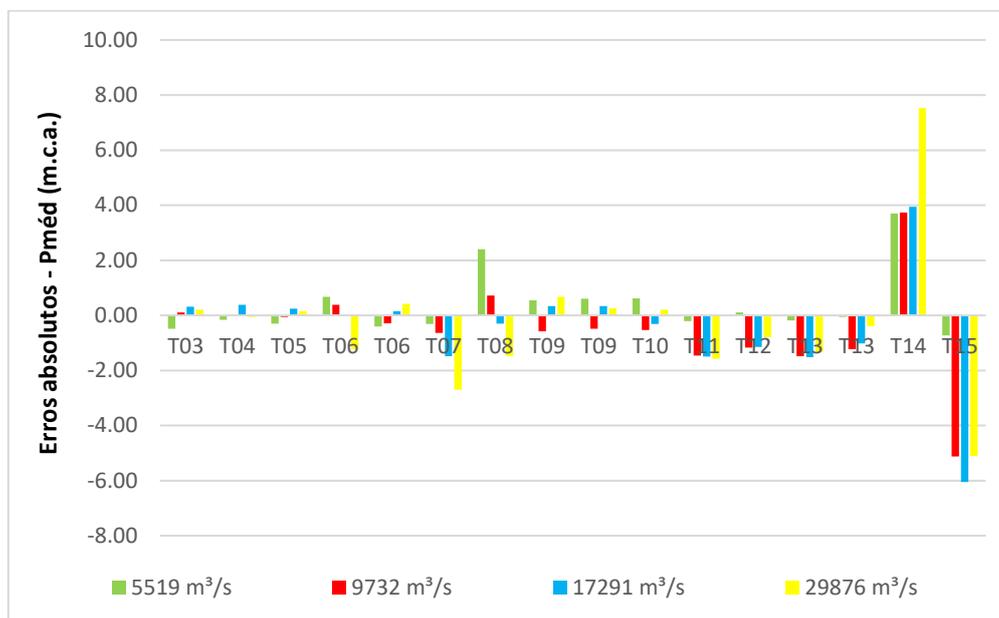


Figura 51. Representação gráfica dos erros absolutos obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para a condição de $S=1,2$.

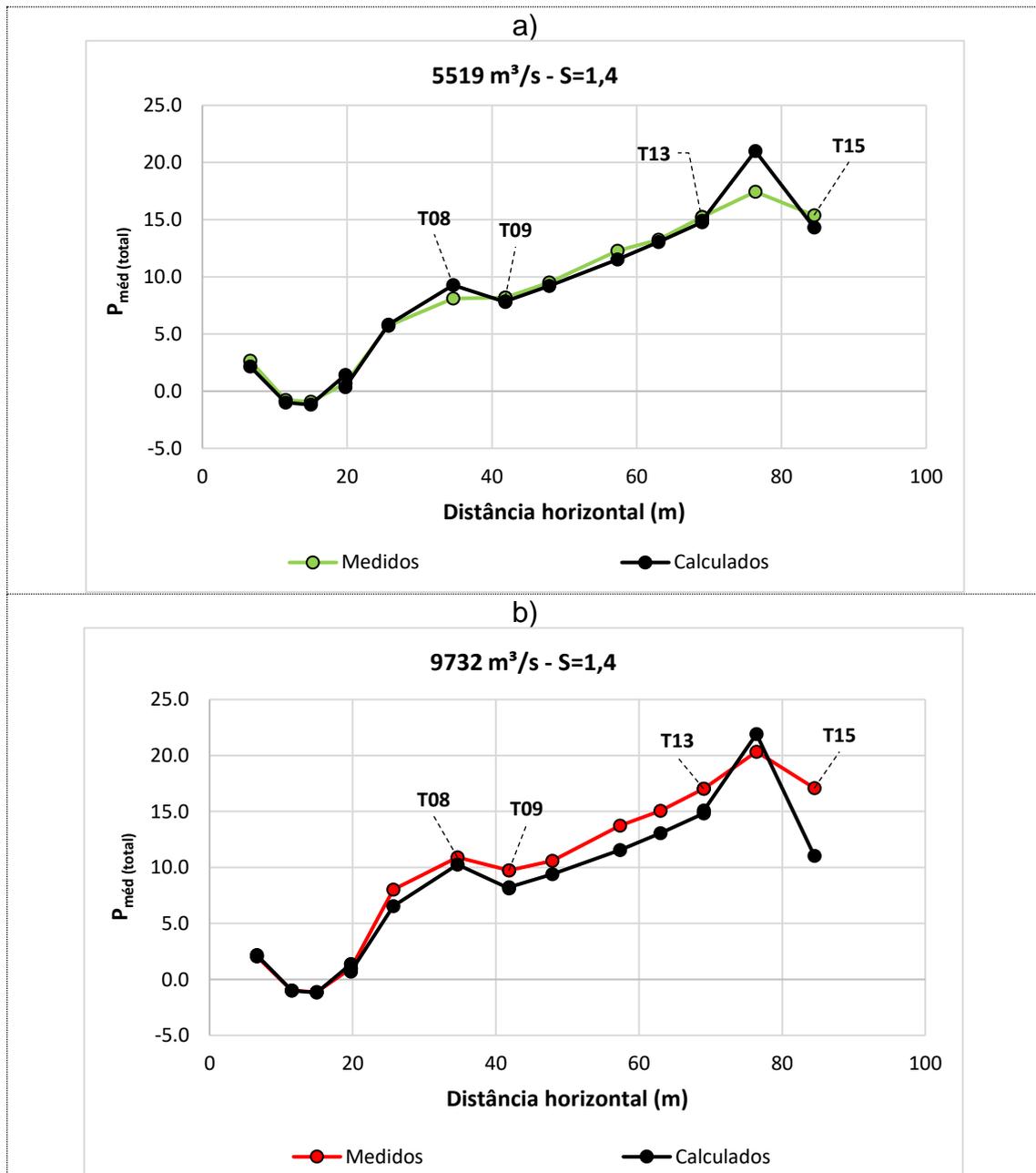
Nesta condição de ensaio, entre as tomadas T03 e T13, pode-se afirmar que os erros, em módulo, são inferiores à 2 m.c.a. para todas as vazões, de modo geral. As exceções consistem da tomada T07 para a vazão de 29876 m³/s e T08 para a vazão de 5519 m³/s. Para as tomadas mencionadas, a discrepância provém da parcela de escoamento livre, com o equacionamento do trecho 2.

Nas tomadas T11, T12 e T13, a metodologia proposta subestima as pressões médias para as três maiores vazões ensaiadas. Nas tomadas T12 e T13, a divergência é originada na determinação da $P_{méd} (RH)$, entretanto, na tomada T11, a diferença vem dos ajustes para $P_{méd} (EL)$. Diante da abordagem adotada para a estimativa da $P_{méd} (EL)$ no trecho 3, onde constatou-se incoerência nos valores de pressão média medidos na tomada T11, entende-se como esperada, e benéfica, a divergência das pressões neste ponto. Para as três tomadas de pressão abordadas neste parágrafo, em média, a metodologia subestima os dados medidos em 1,3 m.c.a.

Por fim, com relação às tomadas T14 e T15, novamente, observam-se os maiores erros absolutos. Sobre estas tomadas, se pode afirmar que a maior fração da divergência observada possui origem no cálculo de $P_{méd} (RH)$.

5.4.3.3. Submergência $S=1,4$

Para a condição ensaiada com grau de submergência $S=1,4$, os resultados obtidos com a aplicação da metodologia desenvolvida estão apresentados na Figura 52.



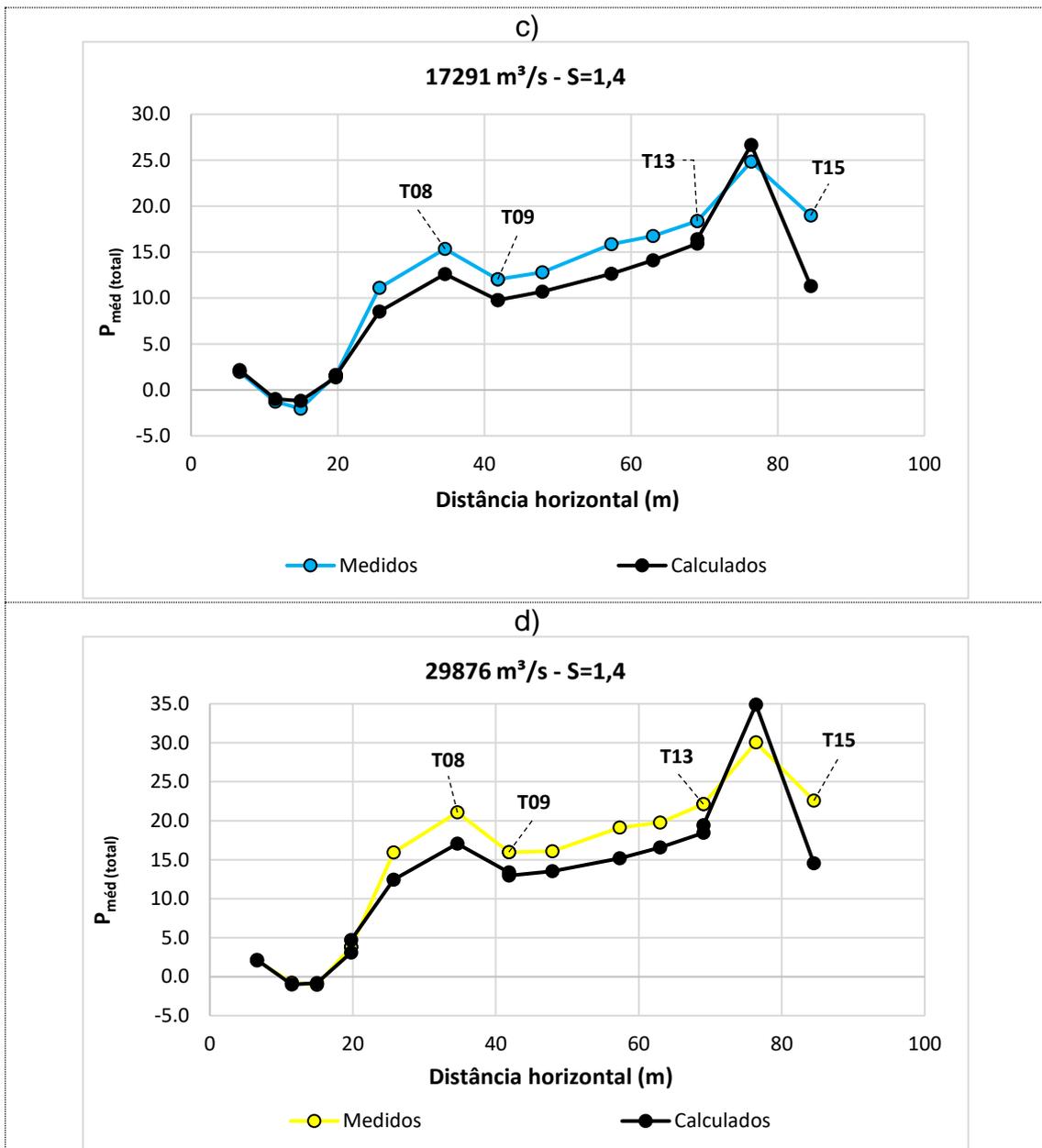


Figura 52. Resultados finais da aplicação da metodologia proposta em condições de $S=1,4$.

Analogamente às condições de ensaio anteriores, as séries de dados calculados e medidos desenvolvem-se de forma parecida entre si. Novamente, para todas as vazões, ocorre uma inversão de sinal do erro absoluto entre as tomadas T13 e T15, pelas mesmas razões mencionadas anteriormente em $S=1,2$. Ademais, cita-se aqui, também, a mudança de sinal ocorrente entre as tomadas T08 e T09, para a vazão de 5519 m³/s. Com o objetivo de tornar mais simples a visualização e avaliação das diferenças relacionadas à aplicação da metodologia proposta, os erros absolutos obtidos para cada tomada e vazão são, mais uma vez, exibidos graficamente, na Figura 53.

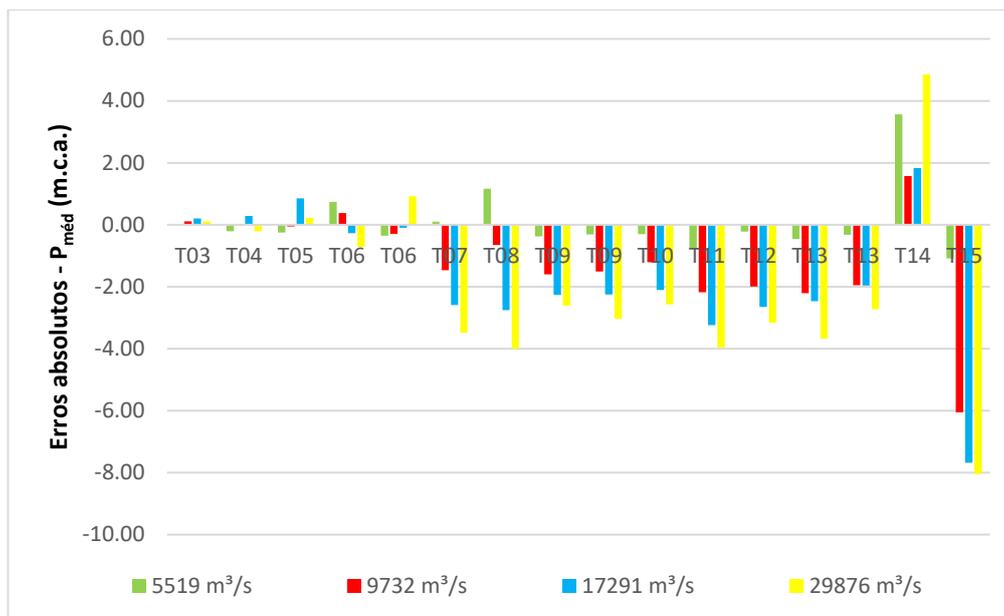


Figura 53. Representação gráfica dos erros absolutos obtidos a partir da aplicação da metodologia proposta para a condição de $S=1,4$.

No trecho entre as tomadas T03 e T13, para as duas menores vazões, observam-se, em módulo, erros absolutos iguais ou inferiores a 2 m.c.a. Em contrapartida, para as duas maiores vazões, no mesmo trecho em questão, os erros absolutos ficaram entre -2 e -4 m.c.a.

De maneira geral, pode-se considerar que, para esta condição de ensaio, a metodologia proposta subestima as pressões ocorrentes ao longo do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, havendo, apenas, a exceção da tomada T14, onde as pressões médias são superestimadas. Entre as tomadas T09 e T13, ou seja, sobre a bacia de dissipação inclinada, os erros absolutos associam-se majoritariamente à parcela de pressão média referente à formação do ressalto. Contudo, novamente, na tomada T11, há influência das $P_{\text{méd}}(\text{EL})$ sobre o erro final em virtude de possíveis erros experimentais.

Na tomada T08 é possível notar uma compensação entre as duas parcelas calculadas. Enquanto que na parcela $P_{\text{méd}}(\text{EL})$ as pressões foram superestimadas, na parcela $P_{\text{méd}}(\text{RH})$ foram subestimadas. Além disso, salienta-se os erros obtidos para a tomada T15, que chegam a atingir -8 m.c.a. para a maior vazão ensaiada.

6. CONCLUSÕES

O objetivo geral do presente trabalho foi analisar e desenvolver uma metodologia para estimar as pressões médias no sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, com condições de formação de ressalto, com diferentes graus de submergência. Desta forma, diante da metodologia proposta, a partir dos equacionamentos ajustados, e de sua respectiva aplicação aos dados, entende-se que o objetivo em questão foi plenamente atendido.

A observação dos resultados experimentais, provenientes das medições em ensaio, proveu a identificação de tendências comportamentais e direcionou os procedimentos de análise à divisão longitudinal do sistema extravasor em diferentes trechos. A abordagem dos parâmetros de interesse a partir dos trechos especificados mostrou-se adequada, gerando, na maioria dos casos, resultados satisfatórios nas estimativas.

Sobre a metodologia para calcular a parcela de $P_{\text{méd}}(\text{EL})$, conforme mencionado nos resultados, em geral, esta, proporcionou erros inferiores, em módulo, à 1 m.c.a. Reitera-se que as maiores diferenças observadas se referem às tomadas centrais do trecho 2 e 4 e à tomada T11. Nestes casos, respectivamente, as discrepâncias se associam à sensibilidade do método na determinação e aplicação do R_{virtual} e à possíveis erros de medição na tomada T11.

Ao aplicar a metodologia para calcular a parcela $P_{\text{méd}}(\text{RH})$ dentro do trecho 1, ou seja, contemplando o vertedouro e bacia de dissipação do sistema, observaram-se erros predominantemente inferiores a 2 m.c.a., em módulo. Entre os cenários de submergência ensaiados, destaca-se que a situação com $S=1,2$, produziu os melhores resultados. Em contrapartida, na situação com $S=1,4$, a metodologia mostrou tendência de subestimar a $P_{\text{méd}}(\text{RH})$, enquanto na situação operacional tende a superestimar. No trecho 2, referente à parte em aclave da soleira terminal, os resultados mostraram-se piores para todos os cenários, em comparação ao primeiro trecho.

Com relação aos resultados finais da aplicação da metodologia proposta para estimar as pressões médias ao longo do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó, pode-se concluir que esta proporciona, em geral, melhores resultados em posições sobre o vertedouro e bacia de dissipação em declive

(T03 à T13). Os resultados obtidos sobre a soleira terminal concentraram os maiores erros absolutos do estudo, na maioria dos casos. Além disso, verifica-se que a vazão de 29876 m³/s exibiu erros significativamente superiores às demais.

Como sugestões e direcionamentos para trabalhos futuros, dando prosseguimento às abordagens propostas, entende-se que o processo de determinação da posição de início do ressalto hidráulico (X_1) pode ser melhorado, visto que, este parâmetro, é responsável por maximizar as discrepâncias na previsão da $P_{\text{méd (RH)}}$ e, conseqüentemente, $P_{\text{méd (total)}}$. A realização de novos ensaios, nas mesmas condições deste trabalho, pode se tratar de uma alternativa, possibilitando a determinação visual de X_1 . Além disso, indica-se a análise de outros parâmetros estatísticos, provenientes de medições instantâneas, como, por exemplo, flutuações de pressão e pressões extremas, de forma a agregar no completo entendimento sobre os esforços atuantes sobre o sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó.

Em conclusão, entende-se que, embora o sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó apresente peculiaridades estruturais, como a bacia de dissipação em declive acrescida de um trecho de soleira terminal em aclave, as abordagens metodológicas aplicadas e os resultados obtidos no presente trabalho, podem ser agregadores em análises de pressões médias ocorrentes em outras obras. A aplicação das análises, realizadas no presente trabalho, em outras estruturas, também, trata-se de um importante direcionamento para estudos futuros. Acredita-se que, quando houver relativa semelhança geométrica, a metodologia proposta possa apresentar resultados preliminares úteis.

7. REFERÊNCIAS

ABDUL KHADER, M. H.; ELANGO, K. **Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump**. Journal of Hydraulic Research, v. 12, n. 4, p. 469–489, 1974.

ABECASIS, F. M. M. **Soleiras descarregadoras. Alguns problemas especiais**. Dissertação de mestrado apresentada ao LNEC. LNEC, Memória n° 175. 110p. Lisboa, 1961.

ARAUZ, I. J. **Vertedor de superfície e escoamento sob comportas**. Dissertação de mestrado – São Paulo. USP, 2005.

AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica**. 9ed. São Paulo: Bucher. 2015.

BAPTISTA, M. B.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. 3ed. Belo Horizonte: UFMG. 480p. 2010.

BLAISDELL, F. W. **The Use of Sand-Beds for Comparing Relative Stilling Basin Performance**. Trans. American Geophysical Union 23, Part II: 633-639. 1942.

BLAISDELL, F. W. **Development and Hydraulic Design, Saint Anthony Falls Stilling Basin**. Trans. ASCE 113: 483-561. 1948.

BOWERS, C. E.; TSAI, F. Y. **Fluctuating pressures in spillway stilling basins**. Journal of the Hydraulics Division, v. 95, n. 6, p. 2071–2080, 1969.

BOWERS, C. E.; TOSO, J. **Karnafuli Project, Model Studies of Spillway Damage**. Journal of Hydraulic Engineering, v. 114, n. 5, p. 469–483, 1988.

BRADLEY, J. N.; PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins: Short Stilling Basin for Canal Structures, Small Outlet Works, and Small Spillways (Basin III)**. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 83 (HY5) Paper N° 1403: 1-22. Discussion 1958, 84 (HY2) Paper N° 1616: 33-39; 84 (HY5) Paper N° 1832: 67-70. 1957.

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

CRAUSSE, E. **Hydraulique des canaux découverts**. Paris: Éditions Eyrolles. 257p. 1951.

CREAGER, W. P.; JUSTIN, J. D. **Hydroelectric Handbook**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1950.

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.

ELETROBRÁS 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.

ELEVATORSKI, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. New York: McGraw-Hill, 1959.

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.

HAGER, W. H. **Energy dissipators and hydraulic jump**. Zurich: Springer Science and Business Media, 1992.

HAGER, W. H. **Classical hydraulic jump: free surface profile**. Canadian Journal of Civil Engineering. v.20, p. 536-539. 1993.

JÚNIOR, A. C. **UHE Foz do Chapecó**. Furnas Centrais Elétricas S.A. Rio de Janeiro. Disponível em: <https://www.furnas.com.br/subsecao/122/usina-foz-do-chapeco?culture=pt>. Acesso em: 10 abr. 2023.

LEMONS, F. O. **Directivas para a colocação de comportas nos descarregadores de barragens**. Lisboa: LNEC. Memória 469. 18p. 1975.

LEMOS, F. O. **Crêterios para o dimensionamento hidráulico de barragens descarregadoras**. Lisboa: LNEC. Memória 556. 57p. 1981.

LOPARDO, R. A. **Metodologia de estimación de presiones instantâneas en cuencos amortiguadores**. Anales de la Universidad de Chile.1985.

LOPARDO, R. A. **Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico**. São Paulo: Curso n. 1: Turbulencia, cavitación y aireación de fenomenos hidráulicos. 1986.

LOPARDO, R. A. **Presiones mínimas y velocidades máximas instant neas en un disipador a resalto hidráulico oscilante**. In: XXIV CONGRESO NACIONAL DEL AGUA. San Juan, 2013

MARQUES, M. G. **Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs   auge**. Tese (Doutorado)—Quebec: Faculte des sciences et g nie de La Universit  Laval, 1995.

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

MEES, A. A. A. **Caracteriza o das solicita es hidrodinâmicas em bacias de dissipacão por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. Disserta o (Mestrado em Recursos Hídricos)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.

NÓBREGA, J. D. **Metodologia teórica e experimental para determina o das características do ressalto hidráulico clássico**. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos. 2014.

ORTIZ, J. P. **Macroturbul ncia de escoamento a jusante de estruturas de dissipacão por ressalto**. Boletim técnico DAEE. v.5, n.3, p. 273-472. São Paulo, 1982.

PETERKA, A. J. **Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators**. US Department Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph 25. Denver, 1984.

PIMENTA, F. C. **Curso de hidráulica geral**. V1, 4ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois. 482p. 1980.

PINHEIRO, A. N. **Acções hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Lisboa: Universidade Técnica de Lisboa, 1995.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica**. 4ed. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 2006.

RAJARATNAM, N. **The hydraulic jump as wall jet**. Journal of the Hydraulics Division. New York, v. 91, n. 5, p. 107-132. 1965.

RAJARATNAM, N. **Hydraulic jumps**. In: CHOW, V. T. (Ed). Advances in Hydrosience. v.4. New York: Academic Press, p. 197-280. 1967.

STEINKE JÚNIOR, R. **Caracterização das pressões em bacias de dissipação por ressalto hidráulico livre com baixo número de Froude**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. 2020.

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.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. Tese (Doutorado em Engenharia)—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2008.

TOSO, J. W.; BOWERS, E. **Extreme Pressures in Hydraulic-jump Stilling Basins**. *Journal of Hydraulic Engineering*. v.114, n.8, p. 829-843. 1988.

USBR. **Research studies on stilling basins, energy dissipators, and associated appurtenances.** Hydraulic Laboratory Report. N° Hyd-399. 1955.

USBR. **Design of Small Dams.** 2ed. US Department of The Interior, Bureau of Reclamation, US Government Printing Office. Washington, DC, 1973.