

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO
AMBIENTAL

ELIANE CONTERATO

ESTUDO DO ESCOAMENTO EM BACIA DE DISSIPACÃO COM SOLEIRA
TERMINAL A JUSANTE DE VERTEDOIRO EM DEGRAUS: CRITÉRIOS PARA O
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Porto Alegre

2022

ELIANE CONTERATO

ESTUDO DO ESCOAMENTO EM BACIA DE DISSIPACÃO COM SOLEIRA
TERMINAL A JUSANTE DE VERTEDOURO EM DEGRAUS: CRITÉRIOS PARA O
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

Coorientador: Prof. Dr. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Porto Alegre

2022

CONTERATO, ELIANE
ESTUDO DO ESCOAMENTO EM BACIA DE DISSIPACÃO COM
SOLEIRA TERMINAL A JUSANTE DE VERTEDOIRO EM DEGRAUS:
CRITÉRIOS PARA O DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO / ELIANE
CONTERATO. -- 2022.

112 f.

Orientador: Marcelo Giulian Marques.

Coorientador: Jorge de Saldanha Gonçalves Matos.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. Soleiras Terminais. 2. Bacias de Dissipação. 3.
Ressalto Hidráulico. 4. Vertedouro em Degraus. I.
Marques, Marcelo Giulian, orient. II. Matos, Jorge de
Saldanha Gonçalves, coorient. III. Título.

ELIANE CONTERATO

ESTUDO DO ESCOAMENTO EM BACIA DE DISSIPACÃO COM SOLEIRA
TERMINAL A JUSANTE DE VERTEDOIRO EM DEGRAUS: CRITÉRIOS PARA O
DIMENSIONAMENTO HIDRÁULICO

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito à obtenção do título de Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Aprovado em Porto Alegre, 27 de maio de 2022

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques
Orientador

Prof. Dr. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos
Coorientador

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá
Examinador

Prof. Dr. Carolina Kuhn Novakoski
Examinadora

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez
Examinador

A todos que defendem a educação e a ciência.

“Só, na verdade, quem pensa certo, mesmo que, às vezes, pense errado, é quem pode ensinar a pensar certo. E uma das condições necessárias a pensar certo é não estarmos demasiado certos de nossas certezas.”

(Paulo Freire)

AGRADECIMENTOS

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental por toda contribuição ao longo de minha formação.

A toda equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas composta por professores, técnicos, bolsistas que sempre ofereceram apoio em todas as etapas do trabalho. Certamente não seria possível a execução de tanto trabalho sem a ajuda de todos.

À Dona Francisca Energética, pelo apoio financeiro ao P&D onde foi desenvolvido o presente trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques pela disponibilidade e pelo incentivo ao longo de todos os anos além da grande contribuição ao presente estudo e à área de obras hidráulicas.

Ao Prof. Dr. Jorge Matos por todas suas contribuições à área da hidráulica e especialmente à pesquisa que possibilitou o presente trabalho.

À família, em especial minha mãe Ana, meus irmãos Fábio e Leandro por todo apoio e compreensão, e ao meu pai Antônio (em memória) que mesmo não fisicamente, está presente em todos os momentos.

RESUMO

A aplicação de soleiras terminais em bacias de dissipação melhora o desempenho da estrutura em relação à distribuição de pressões e dissipação de energia no pé do vertedouro, podendo melhorar a eficiência da mesma. Estudos demonstram que, se corretamente dimensionados, esses acessórios amenizam os impactos causados pelo escoamento macroturbulento além de acomodar adequadamente o ressalto dentro da bacia de dissipação. O presente trabalho aborda resultados de estudo desenvolvido em bacias de dissipação com soleiras terminais triangulares baseando-se em análise de dados de pressão junto ao fundo da bacia. As análises foram realizadas com números de Froude entre 5,98 e 7,44, com soleiras de diferentes alturas e ângulos de inclinação, colocadas em diferentes posições na bacia a jusante de um vertedouro em degraus. Com a análise realizada foi possível avaliar a influência da inclinação, da altura e do posicionamento da soleira no comportamento do escoamento e assim determinar critérios para dimensionamento de bacias de dissipação a jusante de vertedouros em degraus, contribuindo para projetos mais eficientes e econômicos. Os resultados mostraram que as flutuações de pressão na bacia diminuem com a inserção de soleiras terminais. A jusante da bacia foi possível concluir que as flutuações diminuem conforme é reduzido o ângulo da soleira. Entre as posições de soleira estudadas, a equivalente a 1/2 da altura do vertedouro apresentou os menores valores de flutuações máximas.

Palavras-chave: Soleiras Terminais. Bacias de Dissipação. Ressalto hidráulico. Vertedouro em degraus.

ABSTRACT

The application of end sills in stilling basins improves the performance of the structure in relation to the distribution of pressures and energy dissipation at the foot of the spillway, which can improve its efficiency. Studies show that, if correctly dimensioned, these accessories mitigate the impacts caused by the macroturbulent flow in addition to adequately accommodating the bounce within the dissipation basin. The present work addresses the results of a study carried out in stilling basins with triangular end sills, based on the analysis of pressure data at the bottom of the basin. Analyzes were performed with Froude numbers between 5.98 and 7.44, with end sills of different heights and angles of inclination, placed in different positions in the basin downstream of a stepped spillway. With the analysis carried out, it was possible to evaluate the influence of the slope, height and positioning of the end sill on the flow behavior and thus determine criteria for the design of dissipation basins downstream of stepped spillways, contributing to more efficient and economical projects. The results showed that the pressure fluctuations in the basin decrease with the insertion of end sills. Downstream of the basin it was possible to conclude that the fluctuations decrease as the end sill angle is reduced. Among the end sill positions studied, the equivalent of 1/2 of the spillway height showed the lowest values of maximum fluctuations.

Keywords: End Sills. Stilling Basins. Hydraulic Jump. Stepped Spillway.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação esquemática de uma bacia I. Fonte: adaptado de Peterka (1984)	23
Figura 2: Representação esquemática de uma bacia com soleira terminal. Fonte: adaptado de Peterka (1984)	23
Figura 3: Representação esquemática de um vertedouro com salto esqui (fonte: adaptado de Yuditiskii (1983).	24
Figura 4: Representação esquemática de um vertedouro em degraus Fonte: Adaptado de Novakoski et al. (2017)	24
Figura 5: Esquema de ressalto hidráulico clássico. Fonte: elaborado pela autora.	25
Figura 6: Formas de ressalto hidráulico livre. Fonte: Peterka (1984).	26
Figura 7: Alturas conjugadas do ressalto hidráulico. Fonte: elaborado pela autora.....	27
Figura 8: Relação entre as alturas conjugadas (Y_2/Y_1) em função do Fr_1 para ressalto livre. Fonte: adaptado de Teixeira (2008).....	28
Figura 9: Comprimento do ressalto em termos de Y_1 . Fonte: Peterka (1984).....	30
Figura 10: Pressões brutas em bacia de dissipação para diferentes vazões e submergências. Fonte: Conterato (2014).	32
Figura 11: Pressões médias adimensionalizadas. Fonte: Teixeira (2003).....	34
Figura 12: Flutuações de pressões adimensionalizadas. Fonte: Teixeira (2003)	34
Figura 13: Erosão no pé da barragem de Porto Colômbia, MG. Fonte: Large Brazilian Spillways (2002).....	35
Figura 14: Proporções recomendadas para blocos de calha e soleiras dentadas. Fonte: Peterka (1984).	36
Figura 15: Proporções recomendadas para blocos dispersores no vertedouro, na bacia e soleiras terminais. Fonte: Peterka (1984)	37
Figura 16: Diferentes geometrias de blocos testados pelo autor. Fonte: Peterka (1984)	38
Figura 17: Alturas recomendadas para blocos dispersores e soleiras terminais em função do Froude. Fonte: Peterka, (1984).....	38
Figura 18: Comprimento da bacia em função do Froude para bacias tipo I, II e III. (D_2 equivale a Y_2). Fonte: Peterka (1984)	39
Figura 19: Ressonho em bacia com soleira retangular, a) submerso e b) livre. Fonte: adaptado de Vischer e Hager (1995).....	40
Figura 20: Comparação entre, a) ressonho clássico e b) com soleira. Fonte: Vischer e Hager (1995)	40
Figura 21: Ressonho hidráulico em bacia com soleira vertical. Fonte: Alikhani et al. (2010). .	42
Figura 22: Geometria da soleira em função das condições de entrada Fonte: Alikhani et al. (2010).	42
Figura 23: Modelo utilizado nos ensaios. Fonte: Cardoso (2006).....	43

Figura 24: Valores médios das alturas piezométricas na bacia com e sem acessórios para vazão de 100 l/s. Fonte: adaptado de Cardoso (2006).....	44
Figura 25: Valores médios das alturas de escoamento na bacia nas duas condições estudadas em relação ao posicionamento do ressalto para vazão de 100 l/s. Fonte: adaptado de Cardoso (2006).....	45
Figura 26: Modelo utilizado por Meireles <i>et al.</i> (2010).....	45
Figura 27: Comparação entre os resultados obtidos no estudo de Meireles <i>et al.</i> (2010) e Meireles <i>et al.</i> (2005), bacia com acessórios e bacia tipo I, respectivamente. Fonte: Meireles <i>et al.</i> (2010).....	46
Figura 28: Configurações de bacias tipo III estudadas por Bung <i>et al.</i> (2012). Fonte: Bung <i>et al.</i> (2012).....	47
Figura 29: Altura ideal considerando as flutuações a montante da soleira para que as flutuações sejam mínimas e não ocorra escoamento tipo <i>Weir Flow</i> . Fonte: Conterato (2014).....	48
Figura 30: Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude. Fonte: Conterato (2014).....	49
Figura 31: Posição ideal da soleira terminal em função do número de Froude. Fonte: Conterato (2014).....	49
Figura 32: Comparação dos resultados de altura da soleira em relação à outros autores. Fonte: Conterato (2014).....	50
Figura 33: Comparação dos resultados de posição da soleira em relação a outros autores. Fonte: Conterato (2014).....	50
Figura 34: Esquema de modelo utilizado por Tabajadi et al (2018).....	51
Figura 35: Pressões adimensionalizadas para diferentes ângulos de soleira. Fonte: Tabajadi et al (2018).....	51
Figura 36: Tipos de ressalto utilizados no estudo realizados para vazão de 26,7 l/s. Fonte: Fecarotta et al. (2016).....	52
Figura 37: Coeficientes de flutuação de pressão para os diferentes ressaltos estudados. Fonte: Fecarotta et al. (2016).....	53
Figura 38: Modelo físico utilizado por Hunt and Kadavy (2021) – bacias tipo (a) II, (b) III e (c) IV.....	54
Figura 39: Comparação e pressões relativas obtidas para as diferentes configurações de bacias. Fonte: Hunt and Kadavy (2021).....	54
Figura 40: Esquema geral do modelo utilizado.....	55
Figura 41: Modelo instalado no LOH/IPH.....	56
Figura 42: Ilustrações das soleiras utilizadas.....	58
Figura 43: Esquema mostrando as três diferentes posições dentro da bacia. Fonte: adaptado de Conterato (2014).....	58
Figura 44: Detalhe do posicionamento das tomadas de pressão junto ao fundo do canal. Fonte: Conterato (2014).....	59

Figura 45: Placa de aquisição e transdutor utilizado.	59
Figura 46: Detalhe da distribuição longitudinal das flutuações de pressões a jusante da bacia com soleira de 12 cm de altura na posição 1/2H, para todas as vazões ensaiadas.	60
Figura 47: Escoamento em bacia com soleira de 10 cm de altura, declividade 1V:3H, na posição 1/2 H _v (122,5cm).	63
Figura 48: Escoamento em bacia com soleira de 10 cm de altura, declividade 1V:2H, na posição 1/2 H _v (122,5cm).	63
Figura 49: Escoamento em bacia com soleira de 10 cm de altura, declividade 1V:1H, na posição 1/2 H _v (122,5cm). Fonte: Conterato (2014)	64
Figura 50: Resultados de pressões médias para soleira de 12 cm na posição 1/2 H _v (122,5cm), inclinação 1V:2H.	64
Figura 51: Resultados de pressões médias para soleira de 12 cm na posição 2/3 H _v (163,3cm), inclinação 1V:2H.	65
Figura 52: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 40 l/s em comparação com bacia tipo I.	66
Figura 53: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 60 l/s em comparação com bacia tipo I.	66
Figura 54: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 80 l/s em comparação com bacia tipo I.	67
Figura 55: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 100 l/s em comparação com bacia tipo I.	67
Figura 56: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 110 l/s em comparação com bacia tipo I.	68
Figura 57: Resultados de flutuações de pressão para soleira de 12 cm na posição 1/2 H _v (122,5cm), inclinação 1V:2H.	69
Figura 58: Resultados de flutuações de pressão para soleira de 12 cm na posição 2/3 H _v (163,3cm), inclinação 1V:2H.	69
Figura 59: Escoamento sobre a soleira com declividade 1V:3H, altura 18 cm e número de Froude 7,44.	70
Figura 60: Imagem detalhando o escoamento a jusante de uma soleira terminal (zona de recirculação e impacto do jato lançado pela soleira).	71
Figura 61: Valores adimensionalizados de máxima flutuação ($\sigma_{pm\acute{a}x}$) em função da altura adimensionalizada da soleira (s/Y1) para as 3 posições e Fr = 6,91, com soleira na declividade 1V:2H.	72
Figura 62: Valores adimensionalizados de máxima flutuação ($\sigma_{pm\acute{a}x}$) em função da altura adimensionalizada da soleira (s/Y1) para as 3 posições e Fr = 6,91, com soleira na declividade 1V:3H.	72
Figura 63: Valores de mínima flutuação máxima adimensionalizada em cada posição relativa de soleira, para declividade de soleira de 1V:2H.	73
Figura 64: Valores de mínima flutuação máxima adimensionalizada em cada posição relativa de soleira, para declividade de soleira de 1V:3H.	74

Figura 65: Valores de altura de soleira adimensionalizados que fornecem o menor $\sigma_{pm\acute{a}x}$, em função do número de Froude, para as três declividades de soleira aqui estudadas....	74
Figura 66: Posição relativa da soleira, para cada número de Froude, que apresentou os menores valores de flutuação máxima para as declividades estudadas.....	75
Figura 67: Menores valores de flutuação máxima adimensionalizada encontrados para cada posição em cada número de Froude para as três declividades estudadas.....	76
Figura 68: Posição relativa da soleira em relação à posição relativa de ocorrência da menor flutuação máxima.	76
Figura 69: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com declividade 1V:1H.....	77
Figura 70: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com declividade 1V:2H. Os resultados da posição 2/3 e 1/1 H_v são coincidentes.	77
Figura 71: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com declividade 1V:3H. Os valores são coincidentes para as três posições.	78
Figura 72: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com todas as declividades.	79
Figura 73: Resultados do gradiente Ω em função da altura relativa da soleira para diferentes posições, para a vazão de 80 l/s ($Fr = 6,91$), com soleira na declividade 1H:2V.....	80
Figura 74: Resultados do gradiente Ω em função da altura relativada soleira para diferentes posições, para a vazão de 80 l/s ($Fr = 6,91$), com soleira na declividade 1H:3V.....	80
Figura 75: Resultados do gradiente Ω para cada posição para declividades diferentes de soleira.	82
Figura 76: Resultados do gradiente Ω para cada posição para declividades diferentes de soleira.	82
Figura 77: Resultados do gradiente Ω para cada posição para declividades diferentes de soleira.	83
Figura 78: Posição adimensionalizada da soleira que apresentou os melhores resultados pela análise do gradiente para as três declividades de soleira utilizadas.	83
Figura 79: Altura adimensionalizada da soleira para cada número de Froude, para as três declividades estudadas.	84
Figura 80: Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude para soleiras com declividades 1V:1H, 1V:2H, 1V:3H.	85
Figura 81: Faixa indicada para posicionamento da soleira considerando três diferentes declividades para cada número de Froude.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Equações sugeridas por diferentes autores para determinação do comprimento do ressalto. Fonte: Adaptado de Conterato (2014).....	30
Tabela 2: Equações sugeridas para comprimento do rolo Fonte: Adaptado de Teixeira (2003)	31
Tabela 3: Alturas limites calculadas. Fonte: Conterato (2014).	48
Tabela 4: Ângulo de cada soleira terminal utilizada na análise.	57
Tabela 5: Características das soleiras estudadas e posicionamento delas na bacia de dissipação	57
Tabela 6: Dados de vazões ensaiadas	58
Tabela 7: Valores de alturas de soleira adimensionalizados (alturas relativas) em função da altura rápida para cada número de Froude.	61
Tabela 8: Posicionamento das soleiras adimensionalizados (posições relativas)	62
Tabela 9: Resultados de menores valores de gradiente encontrados para soleiras com declividade 1V:2H.....	81
Tabela 10: Resultados de menores valores de gradiente encontrados para soleiras com declividade 1V:3H.....	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Fr_1 = número de Froude correspondente à altura rápida;

Fr_2 = número de Froude correspondente à altura lenta;

Fr^* = número de Froude do degrau (também chamado de Froude rugoso);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

H_v = altura da calha do vertedouro (m);

L = distância entre o pé do vertedouro e um ponto qualquer na bacia de dissipação (m);

L_j = comprimento do ressalto (m);

L_r = comprimento do rolo (m);

L_s = distância da entrada do ressalto até a soleira (m);

P = pressão média bruta (m.c.a.);

Q = vazão (l/s);

q = vazão específica (m³/s/m);

S = submergência do ressalto;

s = altura da soleira (m);

s_L = altura da soleira adimensionalizada (relativa);

s_{lim} = altura limite da soleira (m);

T_w = altura da lâmina d'água sobre a bacia de dissipação (m);

v_1 = velocidade do escoamento no início de ressalto (m/s);

v_2 = velocidade do escoamento no final do ressalto (m/s);

x = distância a partir do pé do vertedouro (m);

x_p = distância adimensionalizada (relativa) a partir do pé do vertedouro (m);

y_p = pressão adimensionalizada;

Y_1 = altura conjugada rápida (m);

Y_2 = altura conjugada lenta (m);

Y_3 = altura máxima do escoamento sobre a soleira (m);

α = declividade da calha ($^\circ$);

σ = flutuação de pressão (m);

$\sigma_{pm\acute{a}x}$ = flutuação de pressão adimensionalizada máxima a jusante da soleira;

Ω = relação entre o valor de máxima flutuação de pressão a jusante da soleira e a distância em que ocorre em relação a soleira;

ΔH = perda de carga no ressalto (m);

$\Delta x_{m\acute{a}x}$ = distância adimensionalizada entre o pé da soleira e o ponto de máxima flutuação.

SUMÁRIO

RESUMO.....	17
1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 TEMA.....	19
1.1.1 Delimitação do tema.....	19
1.2 OBJETIVOS.....	20
1.3 OBJETIVO PRINCIPAL.....	20
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.5 JUSTIFICATIVA	20
2 REFERENCIAL TEÓRICO	22
2.1 ESTRUTURAS DE DISSIPACÃO.....	22
2.2 BACIAS DE DISSIPACÃO CONVENCIONAIS (BACIAS DO TIPO I).....	25
2.2.1 O Ressalto Hidráulico	25
2.2.2 Distribuição de pressões em bacias tipo I.....	32
2.3 BACIAS DE DISSIPACÃO COM ELEMENTOS.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	55
3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL	55
3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS	58
3.3 ANÁLISE DE DADOS	59
3.3.1 Análise dos valores de pressões e suas flutuações à montante da soleira.....	60
3.3.2 Análise dos valores de máxima flutuação a jusante da soleira terminal.....	60
4 ANÁLISES DOS RESULTADOS	63
4.1 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES E SUAS FLUTUAÇÕES AO LONGO DA BACIA DE DISSIPACÃO E A JUSANTE DELA	63
4.2 ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO À MONTANTE DA SOLEIRA (NA BACIA DE DISSIPACÃO)	70
4.3 ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO À JUSANTE DA SOLEIRA	70
4.3.1 Resultados da análise considerando a flutuação máxima a jusante da soleira....	71
4.3.2 Resultados da análise considerando a distância de ocorrência da flutuação máxima (análise do gradiente).....	79
4.4 INDICAÇÃO DOS LIMITES PARA DIMENSIONAMENTO.....	84
4.4.1 Altura de soleira	84
4.4.2 Posicionamento da soleira	85
5 CONCLUSÕES.....	87

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	89
REFERÊNCIAS	90
ANEXO I: GRÁFICOS DE PRESSÕES MÉDIAS.....	94
ANEXO II: GRÁFICOS DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO	100
ANEXO III: MÍNIMAS FLUTUAÇÕES MÁXIMAS PARA CADA POSIÇÃO.....	106
ANEXO IV: MENORES GRADIENTES PARA CADA POSIÇÃO	109

1 INTRODUÇÃO

A construção de barragens sempre esteve presente na sociedade sendo elas protagonistas de diferentes usos, seja para garantir acúmulo de água para abastecimento, geração de energia, irrigação, recreação entre outros. A primeira construída para fins de geração de energia no Brasil foi a barragem do Ribeirão do Inferno, em Minas Gerais, em 1883. A partir do final de 1950 houve um aumento de construções de barragens no Brasil, que é hoje um dos maiores construtores mundiais de barragens e o segundo país que gera mais energia hidrelétrica no mundo, atrás da China (OLIVEIRA, 2018).

Cada barragem possui uma configuração única baseada nas condições de operação, nas características físicas do local de implantação e na sua finalidade. Na construção de qualquer obra hidráulica uma das preocupações é atenuar os impactos causados pela mesma às condições naturais do local. Em uma barragem cada estrutura deve ser projetada para garantir a melhor eficiência causando o menor prejuízo possível ao meio onde está inserida.

Estruturas de dissipação devem ser projetadas sempre que houver necessidade de amenizar o impacto causado pelo excesso de energia a ser dissipada em uma barragem. Pinheiro (2006) salienta que a jusante de uma estrutura de dissipação haverá sempre uma energia residual por dissipar associada à turbulência do escoamento efluente da estrutura. Essa energia exercerá uma ação erosiva no leito a jusante da estrutura que poderá requerer medidas adicionais de proteção. A intensidade dessa turbulência residual poderá constituir uma medida da eficiência da estrutura de dissipação escolhida para amenizar esse impacto.

O uso de vertedouros em degraus se torna atraente pela sua técnica de construção e pela grande dissipação de energia ao longo de sua calha. O interesse em analisar o escoamento nesse tipo de calha resultou em trabalhos como o de Tozzi (1992), Matos (1999) Sanagiotto (2003), Povh (2000), Dai Prá (2004), Amador (2005), Gomes (2006), Meireles (2011) entre outros. Autores que analisaram a dissipação de energia nessas estruturas indicam uma redução variando de 60% a 80% da energia total a montante do vertedouro em função da altura e vazão específica vertida. Portanto, o uso desse tipo de calha em conjunto com bacia de dissipação por ressalto hidráulico pode ser uma alternativa muito interessante para dissipação de energia em obras hidráulicas.

Bacias de dissipação por ressalto hidráulico são alternativas eficientes tendo ampla utilização. A instalação de acessórios nessas bacias pode melhorar a eficiência na dissipação e, conseqüentemente, diminuir os custos de implantação da estrutura, tornando a bacia compacta em relação à bacia sem acessórios (bacia tipo I), considerada a bacia tradicional. Esses acessórios podem ser utilizados em diversas combinações. Peterka (1984) apresenta diferentes configurações de bacias de dissipação, incluindo bacias com elementos inseridos no início, ao longo e no final da estrutura.

O uso de soleiras terminais contínuas mostrou-se eficiente em diversos estudos como Meireles *et al.* (2010), que concluiu que a inserção de elementos no interior de uma bacia auxilia na estabilização do ressalto. Hager (1992) constatou que a inserção de soleiras terminais pode reduzir em até 30% o comprimento da bacia.

Entre os diferentes estudos que abordam soleiras terminais, poucos analisam os esforços no interior da bacia de dissipação e a jusante dela através de pressões instantâneas. Essa análise é importante pois reflete os esforços extremos que podem ser significativos a jusante e a montante da soleira, inclusive apontando pontos críticos no funcionamento. O presente trabalho aborda uma análise baseada em dados de pressões instantâneas coletados a montante e a jusante com o intuito de preencher lacunas existentes na bibliografia.

1.1 TEMA

O presente trabalho tem como tema o dimensionamento de bacias de dissipação com acessórios.

1.1.1 Delimitação do tema

O trabalho delimita-se ao estudo de bacia de dissipação em laboratório (instalação experimental) com soleira terminal triangular, sem inserção de blocos ao final da calha ou ao longo dela.

A bacia estudada se localiza a jusante de um vertedouro em degraus. Durante o estudo se manteve constante as características da calha (altura de degrau e declividade).

Devido à complexidade e quantidade de dados coletados, foram limitadas a três as declividades de soleiras (1V:1H, 1V:2H, 1V:3H).

Devido às limitações da estrutura no laboratório e as características da instalação experimental utilizada, a faixa de número de Froude na entrada do ressalto variou de 5,98 a 7,44.

1.2 OBJETIVOS

1.3 OBJETIVO PRINCIPAL

O objetivo principal da pesquisa é propor um método de dimensionamento para soleiras terminais triangulares de diferentes declividades a jusante de vertedouro em degraus através da análise de flutuações de pressão.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos secundários são apresentados a seguir:

- Visualizar as mudanças de comportamento do escoamento em cada situação estudada;
- Analisar a influência da declividade da soleira no comportamento das pressões médias e suas flutuações, no interior da bacia e a jusante dela, em cada situação estudada;
- Analisar a influência da mudança de posição da soleira no comportamento das pressões médias e suas flutuações, no interior da bacia e a jusante dela, em cada situação estudada;
- Propor limites de altura e posicionamento em função do número de Froude, buscando uma faixa segura de operação, considerando as informações obtidas no presente estudo e bibliografia existente.

1.5 JUSTIFICATIVA

A utilização de vertedouros em degraus vem crescendo nas últimas décadas despertando interesse de diversos pesquisadores. O estudo em conjunto com bacias a jusante desse tipo de vertedouro vem apresentando suas vantagens em relação principalmente à dissipação de energia

As soleiras terminais desempenham um papel importante em bacias de dissipação por ressalto hidráulico. Uma soleira pode ser de diferentes geometrias, entre elas triangular, retangular, escalonada, dentada. A inserção de qualquer acessório na bacia de dissipação não deve gerar pontos críticos como regiões de aumento significativo de flutuações de pressões ou áreas com pressões extremas preocupantes para a operação da estrutura, portanto, entender como o escoamento se comporta na presença de soleiras de diferentes geometrias para uma determinada faixa de vazões é fundamental para o seu dimensionamento.

Ao longo de décadas o ressalto hidráulico tem sido foco de muitas pesquisas ao redor do mundo, contudo, ao analisar a bibliografia existente, é perceptível que grande parte dos estudos consideram o ressalto se desenvolvendo em bacias convencionais, sem inserção de acessórios. Ainda, no grupo de estudos que abordam elementos, são encontradas com maior facilidade conclusões formuladas a partir de análises visuais e comportamento médio de pressões. Uma pequena parte apresenta resultados baseados no comportamento das pressões instantâneas ao longo da bacia e a jusante dela.

Uma análise detalhada dos esforços a montante e a jusante da soleira, juntamente com a análise visual do escoamento, é aqui considerada fundamental para identificar limites em relação à altura, geometria e posicionamento da soleira para uma determinada faixa de vazões.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Ao longo das últimas décadas, diferentes trabalhos abordando bacias de dissipação com e sem elementos foram desenvolvidos buscando analisar o funcionamento dessas estruturas. A seguir serão apresentados diferentes trabalhos que contribuem para o entendimento do tema aqui proposto.

2.1 ESTRUTURAS DE DISSIPACÃO

Estruturas de dissipação são projetadas com intuito de proporcionar maior segurança e economia em uma obra hidráulica, já que garantem que o excesso de energia hidráulica seja dissipado de forma segura e eficiente. Ortiz (1982) classifica essas estruturas em dois grandes grupos, que variam basicamente conforme o método de dissipação:

- **Grupo A:** bacias de dissipação e estruturas especiais que tem a finalidade de conter a zona de dissipação de energia hidráulica;
- **Grupo B:** estruturas projetadas para lançar o jato para longe da obra. A dissipação se dá pelo impacto hidrodinâmico no leito do rio longe da estrutura, garantindo a segurança da mesma.

As estruturas contidas no primeiro grupo são mais eficientes quando a curva de descarga do rio se aproxima da altura conjugada do ressalto, que é a condição ideal para o ressalto ficar bem definido e dentro da bacia de dissipação. Como exemplo pode-se citar bacias de dissipação com formação de ressalto hidráulico, estruturas em concha que retém o ressalto hidráulico e vertedouro com a finalidade de dissipar energia durante a queda. No segundo grupo se encaixam estruturas que transferem a função de dissipação ao leito do rio através do lançamento do jato a uma distância suficiente para garantir que a estrutura não seja danificada. Nesse grupo se encaixam estruturas como vertedouro tipo salto esquí e conchas de lançamento.

Marques (1995), baseado na classificação apresentada por Ortiz (1982), apresenta uma classificação que divide dissipadores em 4 grupos:

- **Grupo 1:** A dissipação ocorre dentro da estrutura, geralmente pela formação do ressalto hidráulico clássico. Nesse grupo se inclui a bacia de dissipação

convencional, sem acessórios, também chamada de bacia I, mostrada na Figura 1 e as bacias com soleira terminal, mostrada na Figura 2.

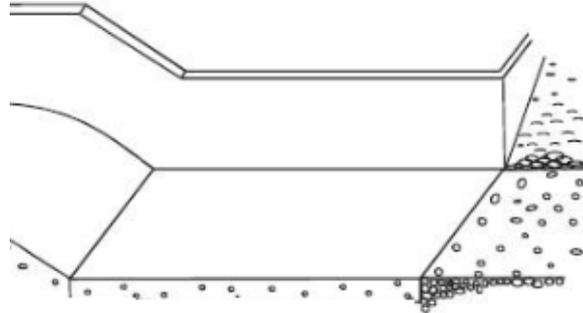


Figura 1: Representação esquemática de uma bacia I. Fonte: adaptado de Peterka (1984)

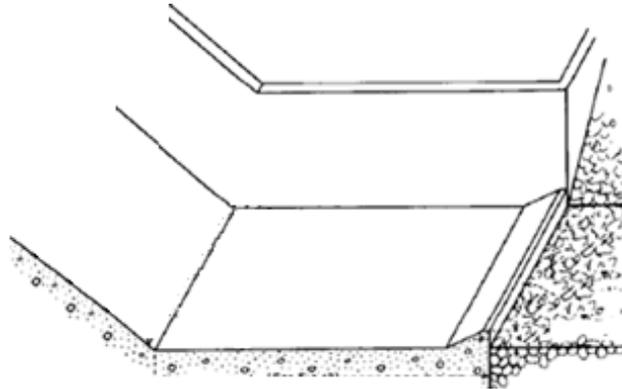


Figura 2: Representação esquemática de uma bacia com soleira terminal. Fonte: adaptado de Peterka (1984)

- **Grupo 2:** Quando o leito do rio é mais resistente, a estrutura pode ser construída de modo a transferir a dissipação de energia para o leito do rio. As estruturas devem garantir que a energia seja dissipada sem danos a estrutura, ou seja, a uma distância suficiente do pé da estrutura. Nessa classificação se inclui vertedores tipo salto esqui e tipo concha. A Figura 3 mostra um esquema de estrutura com vertedouro tipo salto esqui.

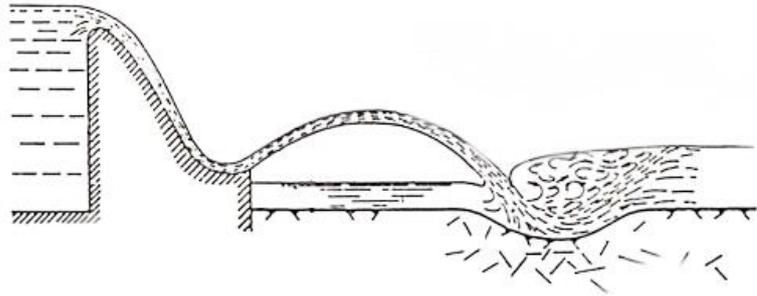


Figura 3: Representação esquemática de um vertedouro com salto esqui (fonte: adaptado de Yuditiskii (1983).

- **Grupo 3:** Neste grupo de dissipadores a energia é dissipada durante a queda, geralmente com singularidades localizadas sobre a superfície do vertedouro causando macroturbulência do escoamento. Nesse grupo se inclui o vertedouro em degraus, mostrado no esquema da Figura 4.

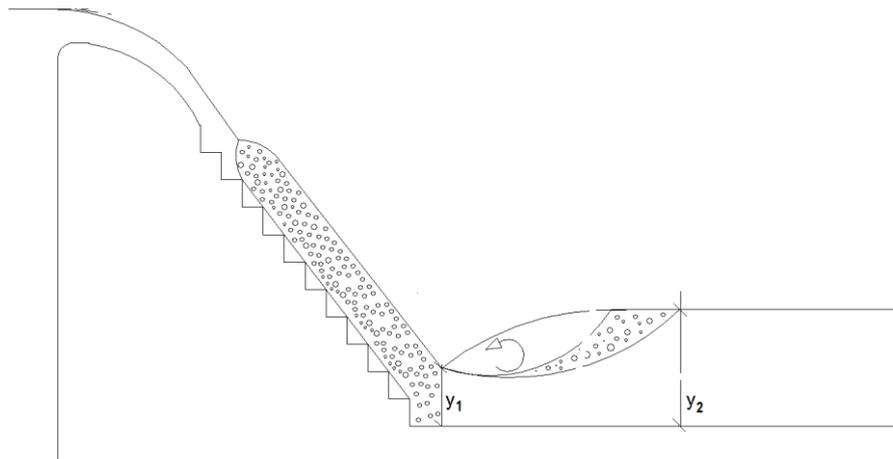


Figura 4: Representação esquemática de um vertedouro em degraus Fonte: Adaptado de Novakoski et al. (2017)

- **Grupo 4:** Este grupo inclui os dissipadores não convencionais que não fazem parte dos primeiros três grupos. Neste grupo podemos encontrar as bacias onde a dissipação é causada por jatos que se atingem durante a queda ou jatos cruzados. Este grupo também inclui bacias pequenas que são usadas em drenagem urbana.

2.2 BACIAS DE DISSIPAÇÃO CONVENCIONAIS (BACIAS DO TIPO I)

Bacias de dissipação que utilizam ressalto hidráulico para dissipação de energia são amplamente utilizadas em engenharia. Essas estruturas são chamadas de bacias convencionais e classificadas como Bacias Tipo I por Peterka (1984). Essas bacias são com frequência estudadas a jusante de vertedouro convencionais e também vertedouros em degraus. Podemos citar trabalhos como Pinheiro (1995), Simões (2008), Mees (2008) Dai Prá (2011), Lopardo (2012), Novakoski (2016) entre inúmeros outros trabalhos desenvolvidos buscando esclarecer os fenômenos envolvidos no funcionamento dessas estruturas. Algumas variáveis importantes a serem consideradas nessas estruturas são abordadas a seguir.

2.2.1 O Ressalto Hidráulico

O ressalto hidráulico é a forma mais tradicional de dissipação de energia existindo um consenso geral em relação às suas características, mas muito a se dizer sobre o seu comportamento interno (MARQUES; DRAPEAU; VERRETTE, 1997).

Conforme Elevatorski (1959), o ressalto se forma quando ocorre a passagem da velocidade supercrítica para velocidade subcrítica e é acompanhado de um impacto violento, consistindo na elevação abrupta do nível da superfície da água na região do impacto. Logo após o ressalto, massas de água de grandes profundidades sobem e provocam aeração do escoamento. A Figura 5 apresenta um esquema do desenvolvimento de um ressalto hidráulico clássico.

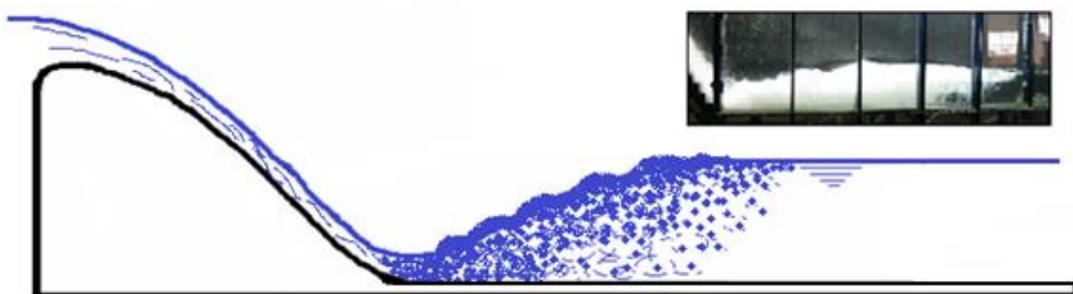


Figura 5: Esquema de ressalto hidráulico clássico. Fonte: elaborado pela autora.

Quando o ressalto ocorre sem nenhuma interferência a jusante que impeça sua formação, é considerado ressalto livre. Conforme Peterka (1984) o ressalto hidráulico pode ocorrer em 4 formas diferentes (Figura 6).

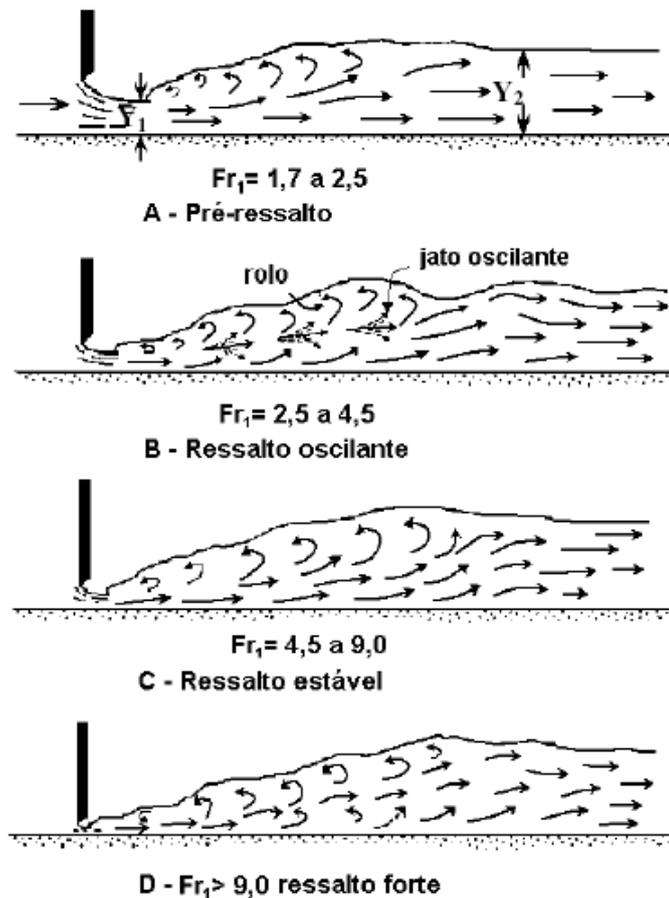


Figura 6: Formas de ressalto hidráulico livre. Fonte: Peterka (1984).

Conforme observado na figura, o autor classifica o tipo de ressalto de acordo com o número de Froude na entrada da bacia:

- Froude de 1,7 até 2,5: se observa apenas pequenas ondulações e formação de pequenos rolos que aumentam conforme o Froude se aproxima de 2,5. Nesse caso a velocidade é bem uniforme em toda a seção e a perda de energia é de cerca de 20%, não necessitando de bacias especiais para conter o escoamento. É classificado como pré-ressalto;
- Froude de 2,5 a 4,5: ocorre o ressalto oscilante. Esse tipo de ressalto gera ondas que se propagam além da bacia de dissipação. É considerado ressalto de transição;
- Froude de 4,5 a 9: Ressalto estabilizado, bem definido. Esse tipo de ressalto mantém a turbulência dentro de si, causando pouca turbulência a jusante da bacia de dissipação. Esse tipo de ressalto dissipa de 45 a 70% da energia total do escoamento;
- Froude > 9 : Ressalto forte. A velocidade é muito alta causando ondas a jusante da estrutura de dissipação. Esse tipo de ressalto dissipa até 85% da energia

Os principais parâmetros para caracterização do ressalto hidráulico estão resumidos a seguir.

a) Alturas conjugadas

A chamada altura rápida (Y_1) corresponde à altura da lâmina d'água na entrada do ressalto, onde inicia a macroturbulência. A altura lenta (Y_2) corresponde à altura a jusante do ressalto, onde o escoamento deixa de ser turbulento e aerado. A Figura 7 demonstra as duas alturas.

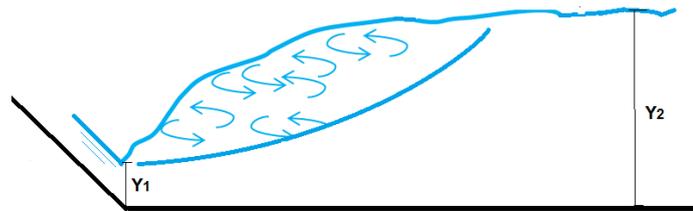


Figura 7: Alturas conjugadas do ressalto hidráulico. Fonte: elaborado pela autora.

A relação entre as duas alturas foi proposta por diferentes autores, entre eles Bélanger (1828), que considera a conservação da quantidade de movimento entre a entrada e saída do ressalto resultando na Equação 1.

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Y_1 = altura conjugada rápida (m);

Y_2 = altura conjugada lenta (m);

F_{r1} = número de Froude correspondente a altura rápida.

Teixeira (2008) apresenta na Figura 8 uma comparação entre os estudos de diferentes autores. O autor expressa em seu trabalho que todas as relações possuem o mesmo padrão de desenvolvimento, ressaltando a equação de Bélanger, em função de ser a mais consagrada.

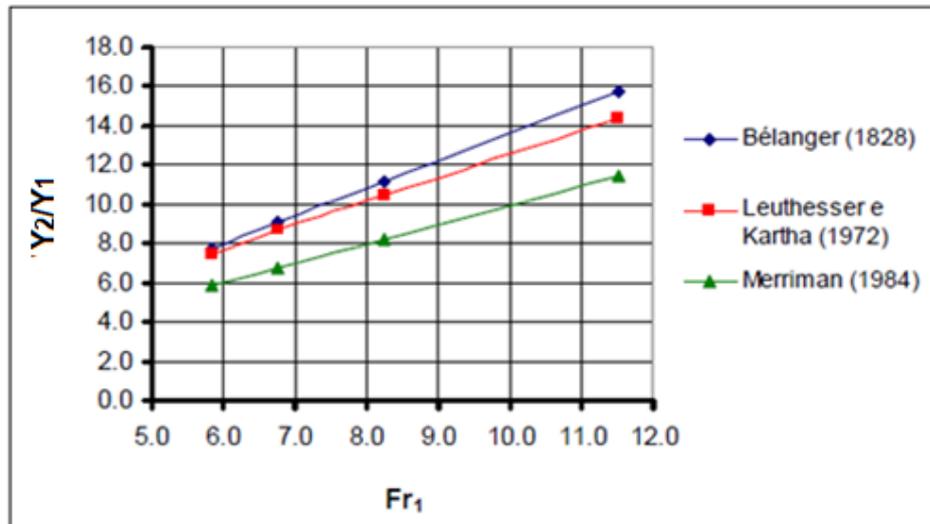


Figura 8: Relação entre as alturas conjugadas (Y_2/Y_1) em função do Fr_1 para ressalto livre. Fonte: adaptado de Teixeira (2008).

b) Submergência

A submergência é a relação entre o nível de jusante e a altura conjugada lenta para a vazão correspondente. Quando o nível de jusante se apresenta maior que a altura lenta, a consequência é a formação de um ressalto afogado. Conforme Wiest (2008), normalmente as condições estabelecidas à jusante de vertedouros ocasionam condições de afogamento da estrutura, ressaltando o interesse neste tipo de situação.

c) Comprimentos importantes no ressalto

O comprimento do ressalto é um dos principais fatores na definição do tamanho da bacia de dissipação. O ressalto é altamente turbulento gerando flutuações de pressões sobre o fundo da bacia que podem levar a destruição do dissipador de energia por fatores como: fadiga, subpressão e danos por cavitação. Portanto, um correto dimensionamento de uma bacia de dissipação deve possuir comprimento suficiente para garantir a acomodação de todo o ressalto.

O rolo é a parcela do ressalto caracterizada pela alta formação de vórtices, elevada incorporação de ar e ejeção de água. A maior parte da dissipação de energia é provocada pela turbulência que ocorre nessa região (NÓBREGA, 2014). Marques et al (1997) relatam que no final do rolo do ressalto, aproximadamente 95% da energia total a dissipar já foi dissipada.

Conforme Dai Prá (2011), não é consenso no meio técnico/científico, a posição exata em que cessam as influências do rolo e do ressalto sobre a estrutura hidráulica e que o rolo é uma zona de particular interesse tendo em vista suas características particularmente macroturbulentas e ainda por ser esta região responsável por praticamente a totalidade da dissipação da energia do escoamento.

Muitos autores estudaram o ressalto a fim de estabelecer limites para cada região. Hager (1992) define o final do comprimento do ressalto quando:

- a superfície livre é essencialmente horizontal;
- a turbulência da superfície é significativamente diminuída;
- o escoamento é sem aeração;
- as condições do escoamento gradualmente variado desaparecem.

Perterka (1984), apresenta como um resultado de seus estudos a relação do comprimento do ressalto em função das características de entrada na bacia de dissipação. A Figura 9 apresenta a curva ajustada dos valores de comprimento de ressalto em termos da altura rápida (L/Y_1) em função do número de Froude na entrada do ressalto.

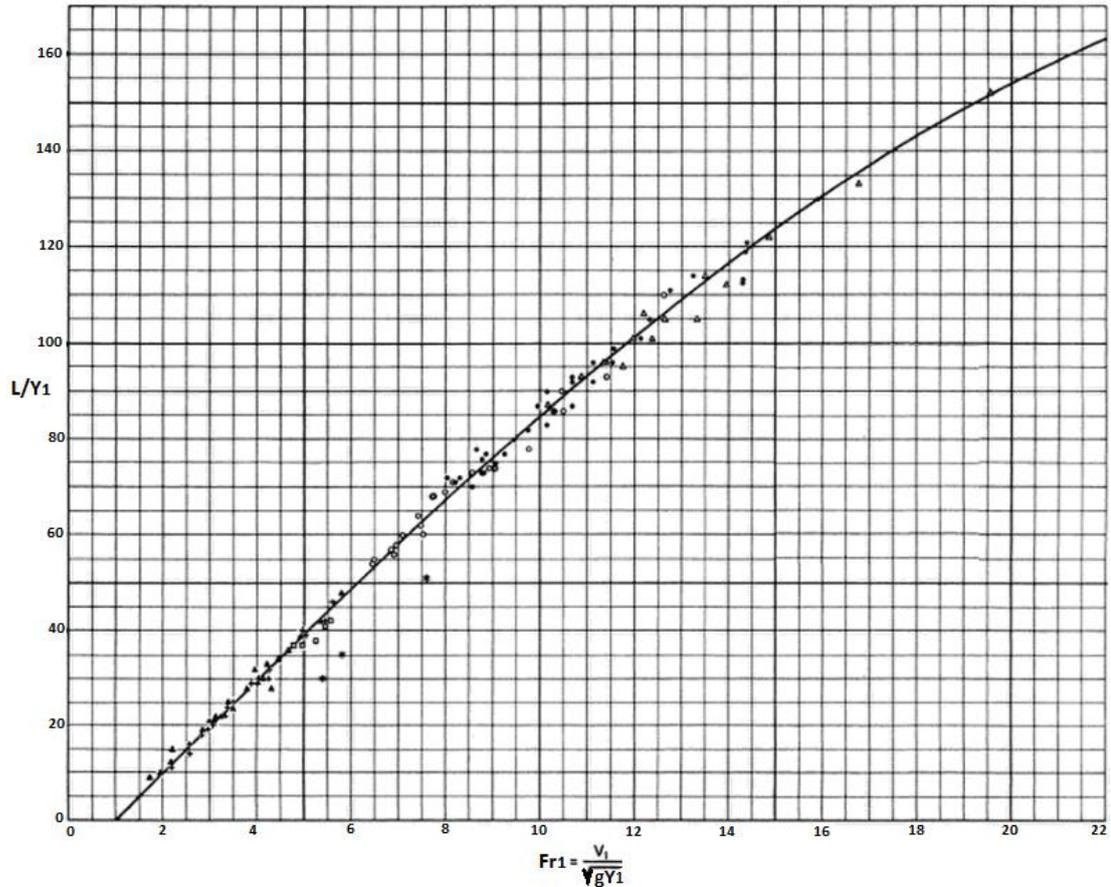


Figura 9: Comprimento do ressalto em termos de Y_1 . Fonte: Peterka (1984)

Outros autores sugerem equações para determinação do comprimento do ressalto em função das alturas conjugadas. No Tabela 1 são mostradas algumas equações propostas ao longo de décadas.

Tabela 1: Equações sugeridas por diferentes autores para determinação do comprimento do ressalto. Fonte: Adaptado de Conterato (2014).

AUTOR	Equações propostas	
Riegel, Beebe (1917)	$L_j = 5(Y_2 - Y_1)$	Equação 2
Aravin (1935)	$L_j = 5,4(Y_2 - Y_1)$	Equação 3
Peterka (1984)	$L_j = 6,1(Y_2)$ $4,5 \leq Fr_1 \leq 9$	Equação 4
Elevatorski (1959)	$L_j = 6,9(Y_2 - Y_1)$	Equação 5
Marques et al (1997)	$L_j = 8,5(Y_2 - Y_1)$	Equação 6

Teixeira (2003)	$L_j = 8(Y_2 - Y_1)$	Equação 7
Simões (2008)	$\frac{L_j}{Y_2} = \frac{Fr_1^2 - 81,85Fr_1 + 61,13}{(-0,62 - 10,71Fr_1)}$	Equação 8

Diferentes autores também propuseram equações para determinação do comprimento do rolo, conforme pode ser observado na tabela abaixo.

Tabela 2: Equações sugeridas para comprimento do rolo Fonte: Adaptado de Teixeira (2003)

AUTOR	Equações propostas	
Safranez (1929)	$\left(\frac{L_r}{Y_1}\right) = 6.Fr_1$	Equação 9
Pietrkowski (1932)	$\left(\frac{L_r}{Y_1}\right) = 5,9.Fr_1$	Equação 10
Einwachter (1933)	$L_r = \left(15,2 - \frac{0,24.Y_2}{Y_1}\right) \left\{ \frac{Y_2}{Y_1} - 1 - v_1 \cdot \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) - 1 \right\}$	Equação 11
Douma (1942)	$L_r = 3.Y_2$	Equação 12
Peterka (1984)	$L_r = 4,5.Y_2, (4,5 \leq Fr_1 \leq 9)$	Equação 13
Newmham (1973)	$L_r = 6,73.(F_1 - 1)$	Equação 14
Hager et al. (1989)	$L_r = 12 + 100. \tan gh\left(\frac{Fr_1}{12,5}\right)$	Equação 15
Marques et al. (1997)	$L_r = 6.(Y_2 - Y_1)$	Equação 16

Onde:

L_j = comprimento do ressalto (m);

Y_1 = altura conjugada rápida no início do ressalto (m);

Y_2 = altura conjugada lenta no final do ressalto (m);
 Fr_1 = número de Froude na entrada do ressalto.

2.2.2 Distribuição de pressões em bacias tipo I

O conhecimento sobre o comportamento das pressões em uma bacia de dissipação é fundamental para o projeto da estrutura. A distribuição de pressões médias junto ao fundo de uma bacia convencional a jusante de um vertedouro em degraus é apresentada por Conterato (2014) na Figura 10, para vazões variando entre 40 e 110 l/s em diferentes submergências.

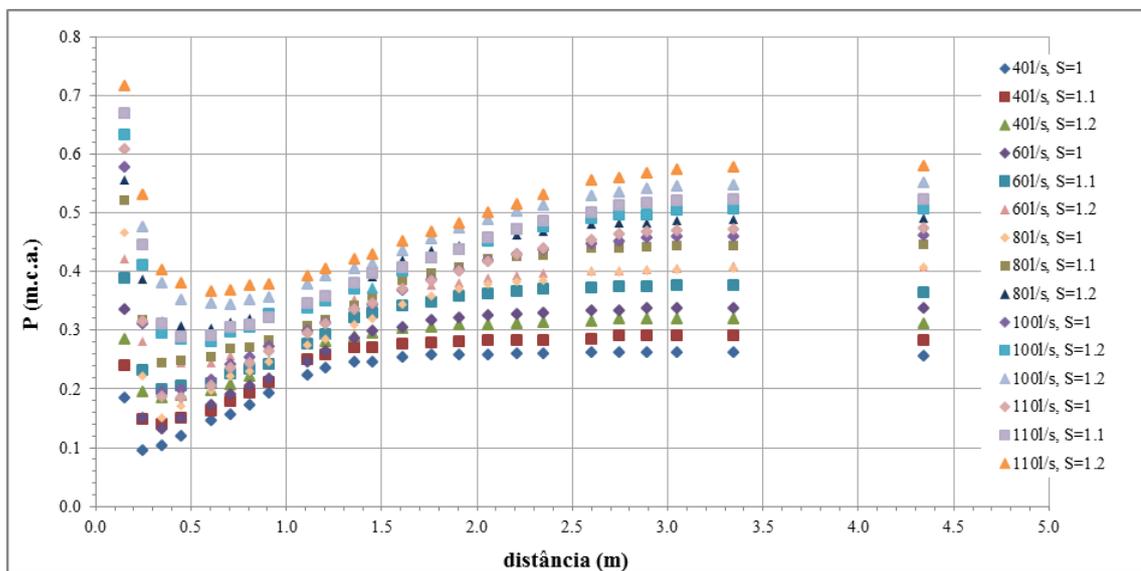


Figura 10: Pressões brutas em bacia de dissipação para diferentes vazões e submergências. Fonte: Conterato (2014).

Na figura é possível visualizar um comportamento bem definido com picos de pressões no início do ressalto, principalmente por não existir curva de concordância entre a calha e a bacia. O comportamento é semelhante para todas as submergências, mostrando o desenvolvimento do ressalto até a estabilização a jusante dele.

Marques et al (1997) estudaram o comportamento de pressões em bacia de dissipação a jusante de um vertedouro de calha lisa com curva de concordância entre a calha e a bacia, para valores de Froude variando entre 4,9 e 9,3. Os autores adimensionalizaram os dados de pressões médias e desvio padrão em função da posição e das alturas do ressalto, conforme as equações abaixo:

$$\frac{P - Y_1}{Y_2 - Y_1} = F\left(\frac{x}{Y_2 - Y_1}\right) \quad \text{Equação 17}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\Delta H}\right)\left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) = F\left(\frac{x}{Y_2 - Y_1}\right) \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

P = pressão média (m.c.a);

σ = desvio padrão das pressões (m);

Y_1 = altura conjugada rápida no início do ressalto, para $S = 1$ (m);

Y_2 = altura conjugada lenta no final do ressalto, para $S = 1$ (m);

x = distância a partir do pé do vertedouro (início do ressalto) (m);

ΔH = perda de carga no ressalto (m);

F = função de ajuste.

No trabalho os autores observaram, além das posições do final de ressalto e final de rolo apresentadas anteriormente, outras duas posições importantes em função das alturas conjugadas:

- ponto de máxima flutuação: $1,75 (Y_2 - Y_1)$;
- descolamento do escoamento junto ao fundo: $4,0 (Y_2 - Y_1)$.

Utilizando a metodologia de adimensionalização proposta por Marques et al (1997), Teixeira (2003) apresentou resultados de pressões médias e de flutuações de pressão em comparação com outros autores que estudaram estruturas semelhantes. A Figura 11 e a Figura 12 apresentam esses resultados, sendo que os pontos preenchidos e o ajuste são produtos do próprio autor, enquanto que os pontos vazados se referem à Endres (1990), Pinheiro (1995) e Marques et al (1997). Nas figuras, T_w corresponde ao nível a jusante do ressalto.

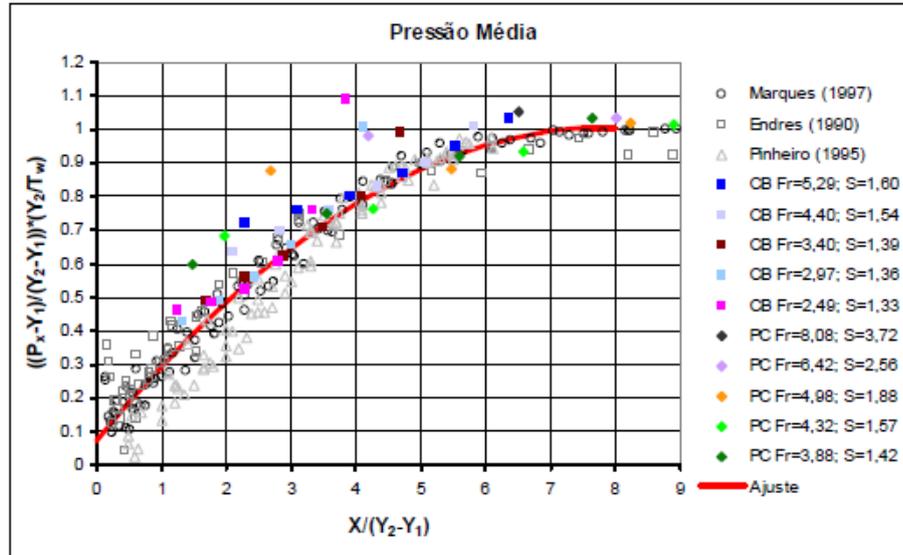


Figura 11: Pressões médias adimensionalizadas. Fonte: Teixeira (2003)

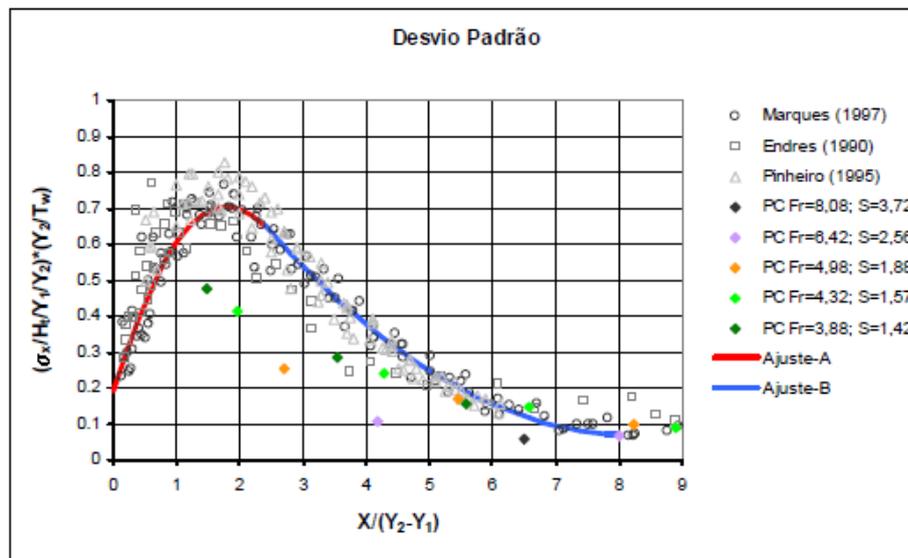


Figura 12: Flutuações de pressões adimensionalizadas. Fonte: Teixeira (2003)

2.3 BACIAS DE DISSIPACÃO COM ELEMENTOS

Conforme Elevatorski (1959) acessórios (elementos) como blocos de calha (*chute blocks*), blocos dispersores na bacia (*baffle piers*) e soleiras terminais na bacia (*end sills*) são geralmente instalados para melhorar o desempenho da bacia de dissipação. Os acessórios auxiliam na estabilização do escoamento, aumentando a turbulência e distribuindo a velocidade equilibradamente através da estrutura. Conforme Pirestani et al. (2012) acessórios afetam até 60% da dissipação da energia que entra em uma bacia, dependendo do número de Froude. Portanto a utilização de elementos pode reduzir o tamanho da estrutura da bacia em determinadas faixas de vazões.

A utilização de blocos no pé ou na calha devem ser utilizados com cautela por conta dos possíveis danos, alguns comprovados conforme pode ser observado no trabalho de McDonald (1980) e Large Brazilian Spillways (2002). Altas velocidades associadas a baixas concentrações de ar podem facilitar o surgimento de erosão e/ou cavitação em volta dos blocos, podendo danificar a estrutura de dissipação. A Figura 13 mostra uma imagem dos blocos de pé na barragem de Porto Colômbia, no Rio Grande, (MG), onde a erosão provocou fossas de até 1,5 m de profundidade.



Figura 13: Erosão no pé da barragem de Porto Colômbia, MG. Fonte: Large Brazilian Spillways (2002).

Alguns estudos indicando inserção de elementos em bacias são encontrados na bibliografia ao longo de décadas, porém não com tanta frequência. Donnelly e Blasdel (1954) observaram o comportamento do escoamento em uma estrutura montada em laboratório com vertedouro de calha lisa, bacia de dissipação e canal de jusante, as últimas duas móveis e ajustáveis a cada condição de ensaio. O objetivo principal do estudo foi a obtenção de critérios de dimensionamento de bacias para evitar danos ao leito do rio a jusante. Para isso o canal de

jusante foi modelado em areia para visualizar a erosão no leito. Os autores testaram bacias de dissipação com blocos dispersores em conjunto com soleiras terminais e observando o escoamento obtiveram valores para altura de blocos e de soleira terminal equivalentes a $0,8hc$ e $0,4hc$,

Um dos estudos que oferecem uma vasta quantidade de informações também sobre bacias não convencionais é o de Perterka (1984), que apresenta resultados de estudos em diferentes configurações das bacias de dissipação, propondo critérios de dimensionamento de elementos. A Figura 14 mostra as dimensões recomendadas pelo autor para bacias com blocos dispersores no final da calha (chute blocks) e soleira terminal dentada (dentated sill), classificada como bacia tipo II. O autor relata que essas orientações garantem bacias adequadas para vertedouros de até 65 m e vazões até $45 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

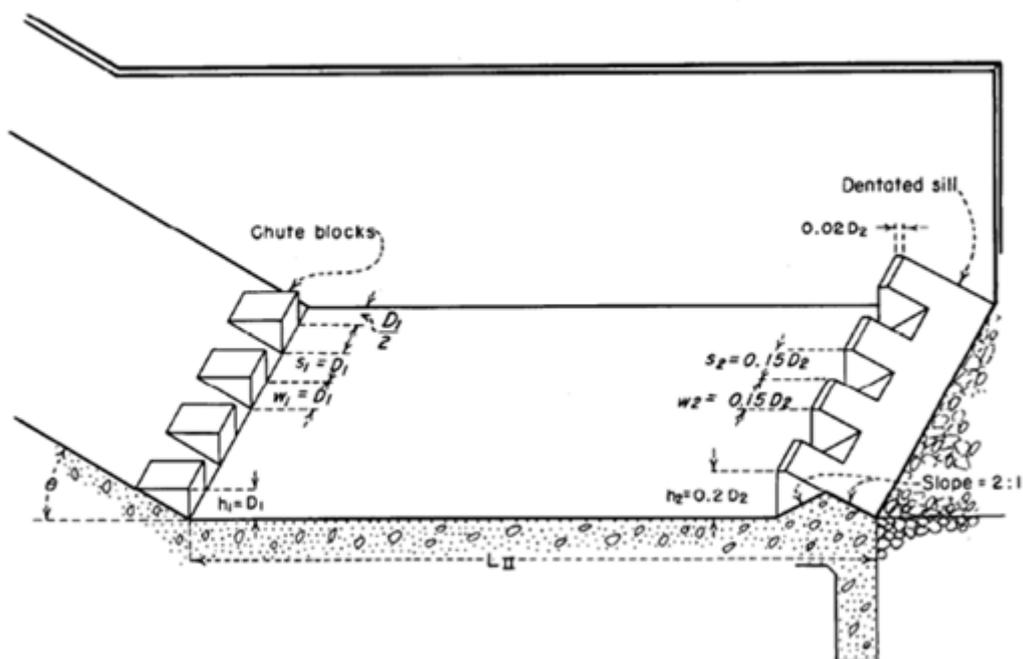


Figura 14: Proporções recomendadas para blocos de calha e soleiras dentadas.
Fonte: Peterka (1984).

O autor apresenta também, na Figura 15, as dimensões recomendadas para bacias com blocos de calha, blocos na bacia e soleira terminal triangular, classificada como bacia tipo III. O autor recomenda essas bacias para barragens onde não se ultrapasse vazões de $18 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, número de Froude deve ser superior a 4,5 e velocidades máximas entre 15 e 18 m/s.

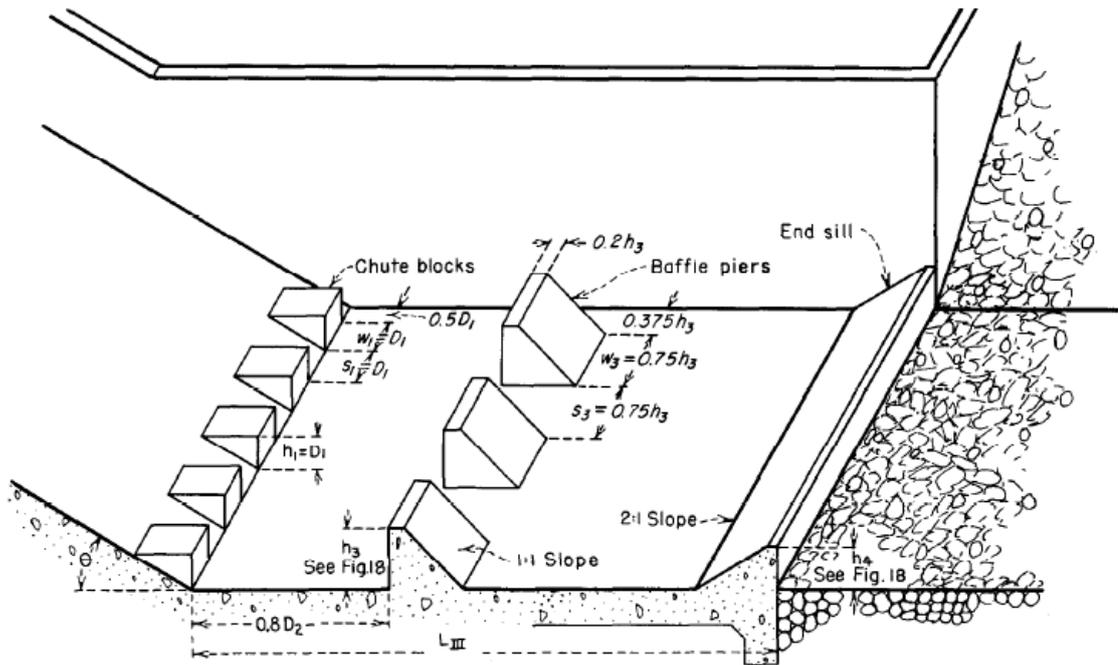


Figura 15: Proporções recomendadas para blocos dispersores no vertedouro, na bacia e soleiras terminais. Fonte: Peterka (1984)

A Figura 16 mostra diferentes geometrias de blocos testadas pelo autor para obtenção dos critérios apresentados. Os blocos foram testados em fileiras simples e fileiras duplas, mas as fileiras duplas não tiveram resultados melhores que fileiras simples. Bons resultados foram obtidos com geometrias do tipo “b”. Os blocos “c” e “d” não apresentaram resultados satisfatórios, segundo o autor não melhoraram a turbulência e o escoamento a jusante do bloco. Os blocos tipo “e” e “f” tiveram comportamento similar, com um resultado satisfatório. O bloco “g” (idêntico ao “f” porém com cantos arredondados) também não obteve um resultado satisfatório, pois o arredondamento dos cantos reduziu significativamente a eficácia do bloco. Como o bloco “f” é preferível estruturalmente foi o adotado pelo autor.

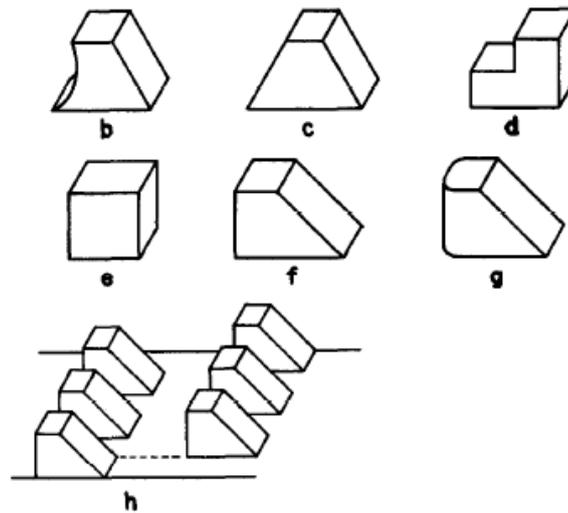


Figura 16: Diferentes geometrias de blocos testados pelo autor. Fonte: Peterka (1984)

O autor também propôs o dimensionamento da altura dos blocos dispersores e da soleira em função do número de Froude na entrada do ressalto, conforme pode ser verificado na Figura 17. A Figura 18 apresenta ajustes para determinação do comprimento da bacia para os três tipos de bacias (I, II e III). O autor salienta que essas indicações servem para os limites indicados. Situações diferentes devem ser estudadas em modelos.

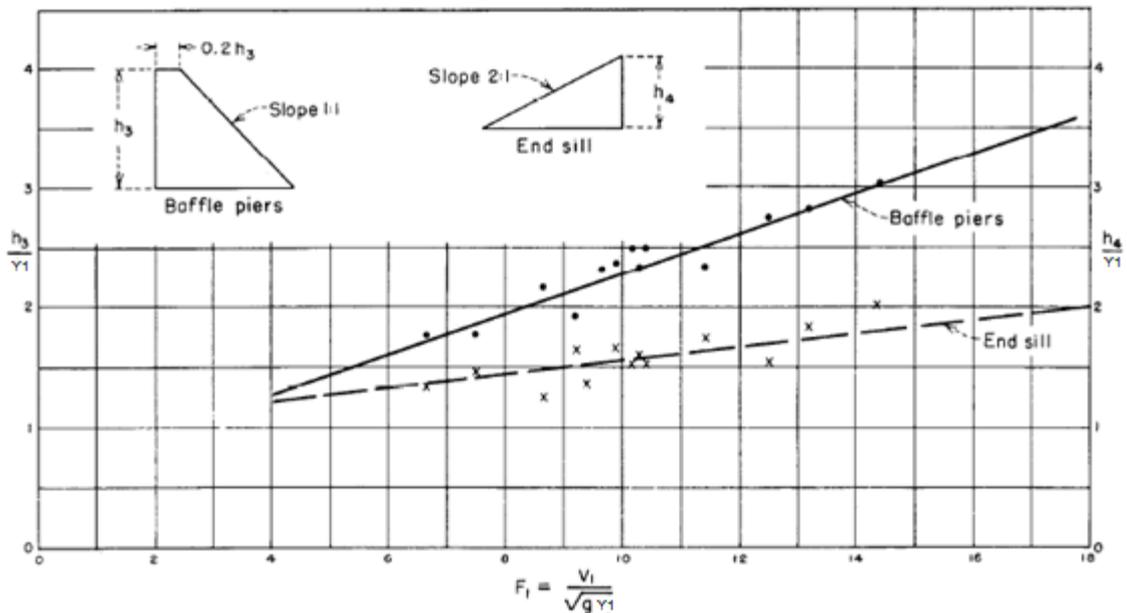


Figura 17: Alturas recomendadas para blocos dispersores e soleiras terminais em função do Froude. Fonte: Peterka, (1984)

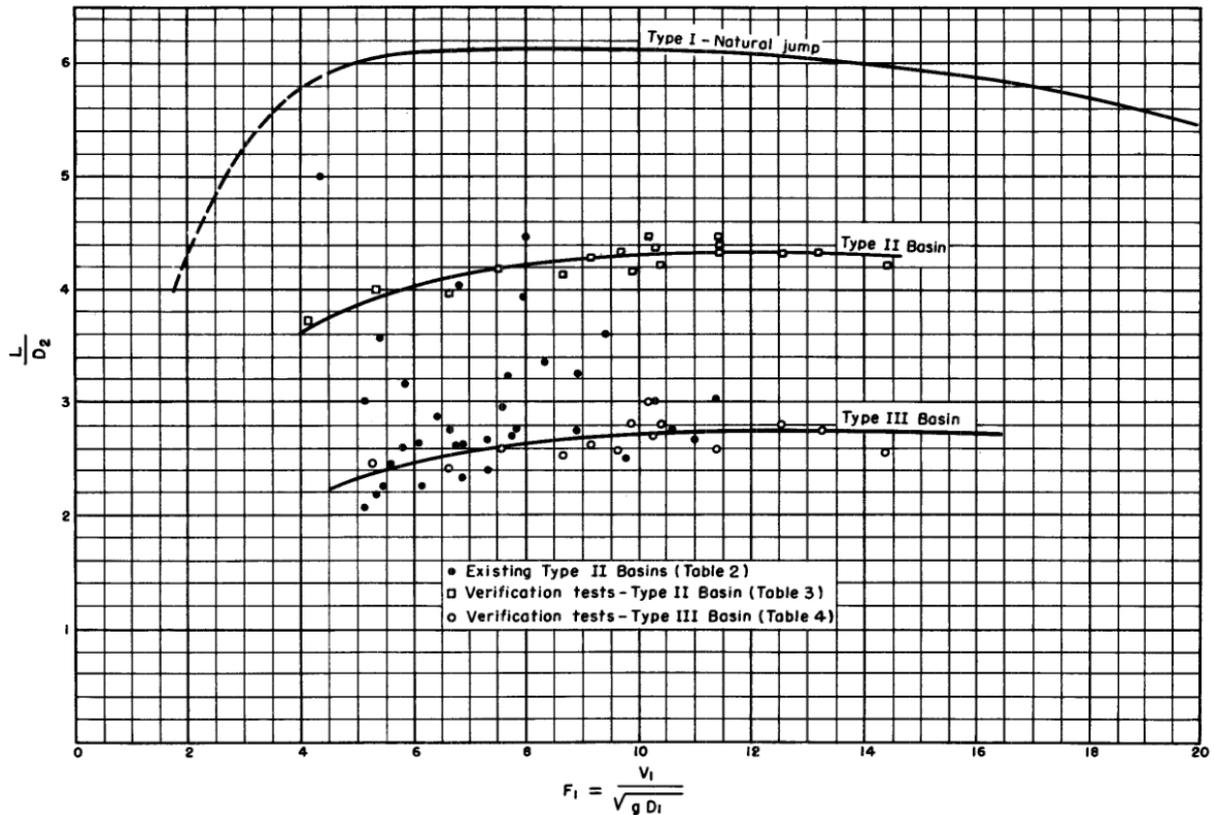


Figura 18: Comprimento da bacia em função do Froude para bacias tipo I, II e III. (D_2 equivale a Y_2). Fonte: Peterka (1984)

Outro estudo envolvendo acessórios em bacias foi apresentado por Vischer e Hager (1995). No estudo foram utilizadas soleiras terminais retangulares e, conforme os autores, uma soleira envolve apenas perturbações locais na sua base e sua espessura não possui efeito discernível sobre o escoamento, sendo que devem possuir uma resistência estrutural suficiente. O escoamento pode ser submerso ou livre, conforme mostrado na Figura 19, mas apenas o caso de escoamento submerso é discutido, pois o nível d'água a jusante é subcrítico, assim como o requerido para o projeto. Os autores concluíram que a soleira pode gerar diferentes tipos de ressalto, conforme colocado a seguir:

- ressalto tipo A (mostrado anteriormente nas classificações de ressalto), com o fim do rolo sobre a soleira;
- ressalto tipo B para um nível de água de jusante baixo, com superfície oscilante na soleira e no fim do rolo a jusante dela;
- ressalto tipo B mínimo com uma superfície de rolo secundária oscilante no escoamento principal, sem atingir a base;
- ressalto tipo C com nível de água a jusante que não é apropriado pois o escoamento primário atinja a base podendo afastar o nível d'água para jusante;

- escoamento tipo onda com escoamento supercrítico sobre a soleira e inaceitáveis condições de dissipação de energia.

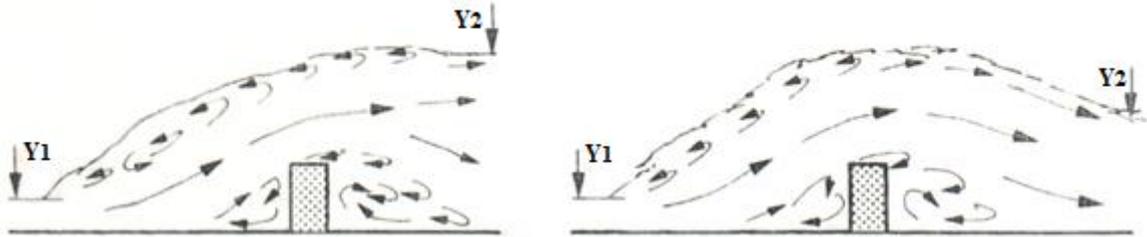


Figura 19: Ressalto em bacia com soleira retangular, a) submerso e b) livre.
Fonte: adaptado de Vischer e Hager (1995)

Os autores usam como parâmetros para análise da soleira submersa os seguintes termos:

- a altura relativa (s/Y_1), onde s é a altura da soleira;
- o número de Froude na entrada do ressaltado e;
- o parâmetro de posição (L_s/Y_1), onde L_s é a distância da soleira, conforme Figura 20;

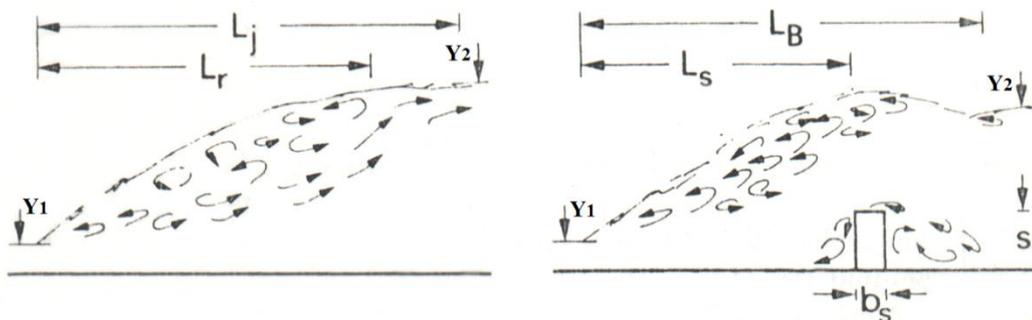


Figura 20: Comparação entre, a) ressaltado clássico e b) com soleira.
Fonte: Vischer e Hager (1995)

Em função dos parâmetros acima citados os autores observam que o ressaltado do tipo A possui um menor potencial de erosão e é adequado para leitos erosivos. O ressaltado tipo B pode erodir porções ao longo das laterais do canal de jusante e o ressaltado tipo B mínimo é adequado apenas para leitos rochosos sob o colchão d'água. Em geral o ressaltado tipo B é recomendado como tipo de escoamento para uma dissipação eficiente.

Os autores observam que para qualquer altura de soleira é necessário um número de Froude mínimo para que haja formação de ressaltado hidráulico, pois do contrário ocorrerá escoamento do tipo *weir flow*, quando a altura sobre a soleira atinge a crítica. Para qualquer número de

Froude os autores limitaram a altura máxima da soleira ($S_L = s/Y_1$) com a Equação 19, e ainda uma considerada “altura ótima” (S_{opt}) para $3 < Fr_1 < 10$ pela Equação 20.

$$S_L = \frac{1}{6} Fr_1^{1,645} \quad \text{Equação 19}$$

$$S_{opt} = 1 + \left(\frac{1}{200} \right) Fr_1^{2,5} \quad \text{Equação 20}$$

Comparando comprimentos de ressalto com ressaltos clássicos, Vischer e Hager (1995) classificaram a soleira como efetiva na estabilização de ressalto hidráulico em bacia curta. Conforme os autores, soleiras são econômicas e efetivas para dissipação de energia.

Alikhani et al. (2010) estudou a influência de uma soleira vertical retangular e sua posição na bacia de dissipação a jusante de vertedouro. O autor testou cinco alturas diferentes de soleiras em três posições na bacia de dissipação para números de Froude na entrada do ressalto variando entre 4 e 12, além disso a relação entre altura da soleira e altura rápida ($S_L = s/y_1$) esteve entre 2 e 8. As características hidráulicas do ressalto foram medidas e comparadas com ressalto hidráulico clássico. A Figura 21 mostra a configuração da bacia estudada pelo autor onde:

L_s = distância da entrada do ressalto até a soleira (m);

Y_1 e Y_2 = altura conjugadas, rápida e lenta respectivamente (m);

Y_3 = altura máxima do escoamento sobre a soleira (m);

s = altura da soleira (m);

S_L = relação entre altura da soleira e altura rápida;

Fr_1 = Froude na entrada do ressalto.

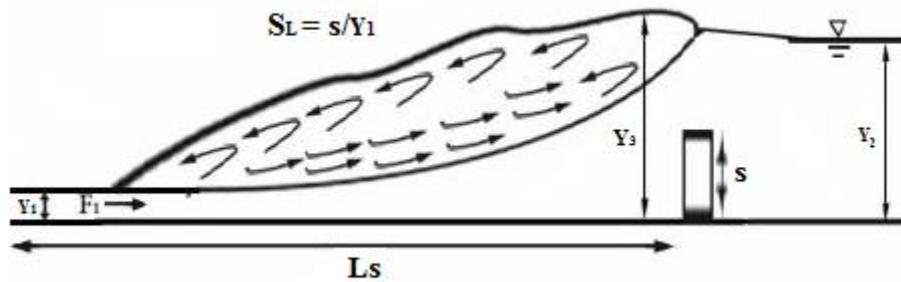


Figura 21: Ressalto hidráulico em bacia com soleira vertical.
Fonte: Alikhani et al. (2010).

Baseado nos experimentos o autor chegou a uma relação entre os parâmetros de entrada na bacia e a altura da soleira. Conhecidos os parâmetros Y_1 e Fr_1 é possível, com base no diagrama apresentado na Figura 22, estimar o posicionamento e a altura da soleira.

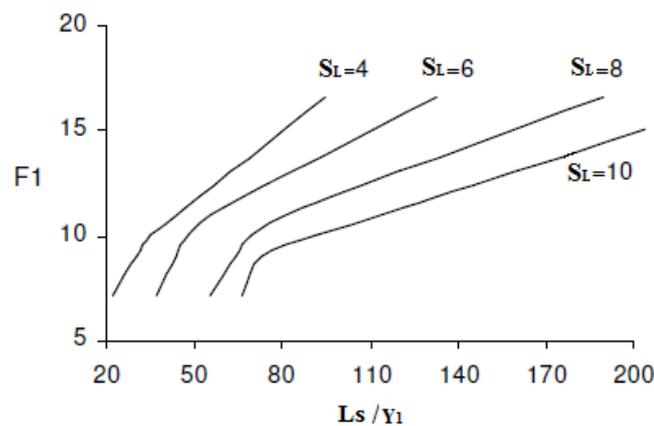


Figura 22: Geometria da soleira em função das condições de entrada
Fonte: Alikhani et al. (2010).

O autor ressalta que a altura da soleira não pode ultrapassar o limite estipulado por Hager (1992) mostrado na Equação 19, pois, a partir desse limite pode ocorrer mudança de escoamento. Como, em função dessa limitação, a escolha do L_s pode precisar de várias estimativas, o autor sugeriu uma equação limitando a faixa de escolha, conforme a Equação 21.

$$3(Y_2 - Y_1) \leq L_s \leq 5(Y_2 - Y_1)$$

Equação 21

O autor concluiu que com a utilização de soleiras terminais com essa geometria é possível reduzir em até 30% o comprimento da bacia em relação a uma bacia livre.

Cardoso (2006) estudou o comportamento do ressalto em bacia tipo III sem blocos de calha e com uma alternativa adaptada deles. Essa bacia foi estudada a jusante de vertedouro em degraus e foi comparada com dados na bacia sem acessórios (tipo I). A análise considerou em um primeiro momento a mesma posição de início de ressalto para os dois tipos de bacia e posteriormente mantendo o mesmo nível de jusante, causando assim um afogamento artificial na bacia.

O autor salienta a importância de estudos de bacias a jusante de desse tipo de vertedouro devido ao aumento de sua utilização e a escassez de critérios específicos para essa configuração. O autor analisou o comportamento de pressões médias adquiridas através de piezômetros instalados na base da bacia, além das alturas do escoamento para vazões específicas variando de 0,08 a 0,2 m³/s/m e números de Froude na entrada do ressalto de 5,0 a 6,5. A Figura 23 mostra o modelo utilizado onde os blocos são instalados a uma distância 32,5 e a soleira a 88,5 cm a partir do início da bacia.



Figura 23: Modelo utilizado nos ensaios. Fonte: Cardoso (2006).

Para o primeiro caso (início do ressalto equivalente para os dois tipos de bacias) o autor apresenta análises do comportamento da linha d'água com a inserção dos acessórios e destaca que ocorre uma diminuição da turbulência do escoamento. Observando o comportamento da altura do escoamento em comparação com o perfil da altura piezométrica o autor concluiu que a inserção dos acessórios indica uma redução no comprimento do ressalto. A Figura 24 apresenta, para uma das vazões estudadas, a comparação dos valores médios das alturas piezométricas na bacia com e sem acessórios.

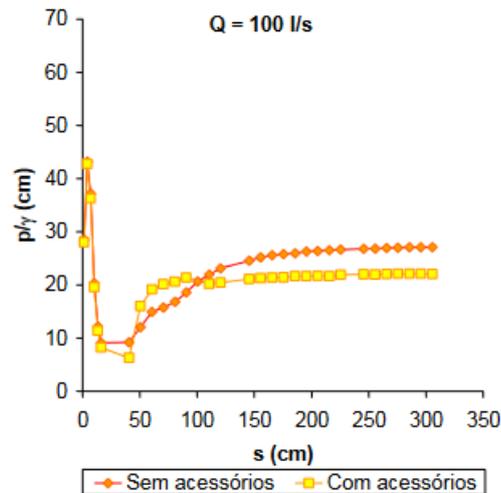


Figura 24: Valores médios das alturas piezométricas na bacia com e sem acessórios para vazão de 100 l/s. Fonte: adaptado de Cardoso (2006)

Entre as conclusões, no que se refere à bacia com acessórios em comparação com bacias tipo I, o autor faz as seguintes considerações:

- a inserção de elementos conduz a uma diminuição do comprimento do ressalto de 40 a 60%;
- a inserção de elementos causa uma diminuição de cerca de 20% da altura do escoamento a jusante do ressalto, para um mesmo posicionamento do início do ressalto;
- em bacias com elementos verifica-se, no trecho inicial, um aumento nos valores de altura do escoamento e altura piezométrica média na bacia.

Para o segundo caso analisado (mantendo a altura de jusante igual para os dois casos de bacias), o autor destaca que a altura do escoamento apresenta valores bastante superiores aos observados anteriormente com ressalto livre. A Figura 25 mostra uma comparação para uma das vazões estudadas. Os resultados foram comparados com os obtidos por Peterka (1984) para bacias tipo III, encontrando resultados semelhantes, mas com algumas considerações sobre a evolução da linha d'água e ondulação a jusante do ressalto.

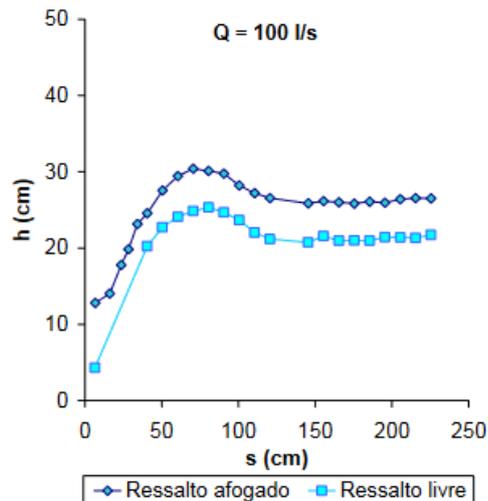


Figura 25: Valores médios das alturas de escoamento na bacia nas duas condições estudadas em relação ao posicionamento do ressalto para vazão de 100 l/s. Fonte: adaptado de Cardoso (2006).

Meireles *et al.* (2010) realizaram estudos em bacias com blocos dispersores no pé do vertedouro (blocos de calha), blocos dispersores na bacia e soleiras terminais, também a jusante de vertedouros em degraus. Os autores também analisaram a influência dos blocos de calha na configuração da bacia estudada. A Figura 26 mostra o modelo utilizado.

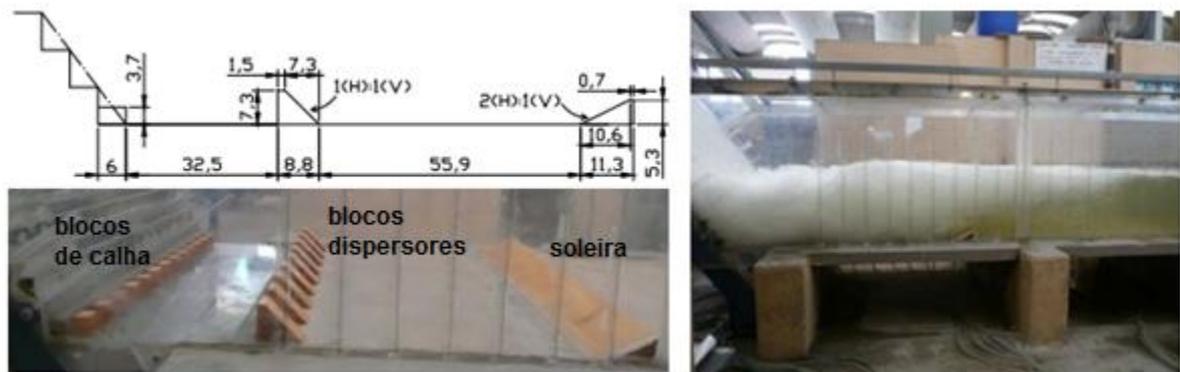


Figura 26: Modelo utilizado por Meireles *et al.* (2010).

A seguir são apresentadas algumas das conclusões apresentadas pelos autores:

- os valores de pressões ao longo da bacia aumentam com a descarga;
- na região de impacto os valores são significativamente maiores do que valores correspondentes para uma distribuição de pressões hidrostática;
- os valores mínimos de pressão ocorrem após os blocos dispersores;

- a influência de blocos de calha mostrou-se irrelevante, não alterando o comportamento das pressões nem do nível d'água, se comparados os resultados com os obtidos em bacia com blocos dispersores e soleiras.

Os autores também compararam os resultados com os dados obtidos em bacia tipo I (sem acessórios), por Meireles *et al.* (2005), conforme demonstrado na Figura 27.

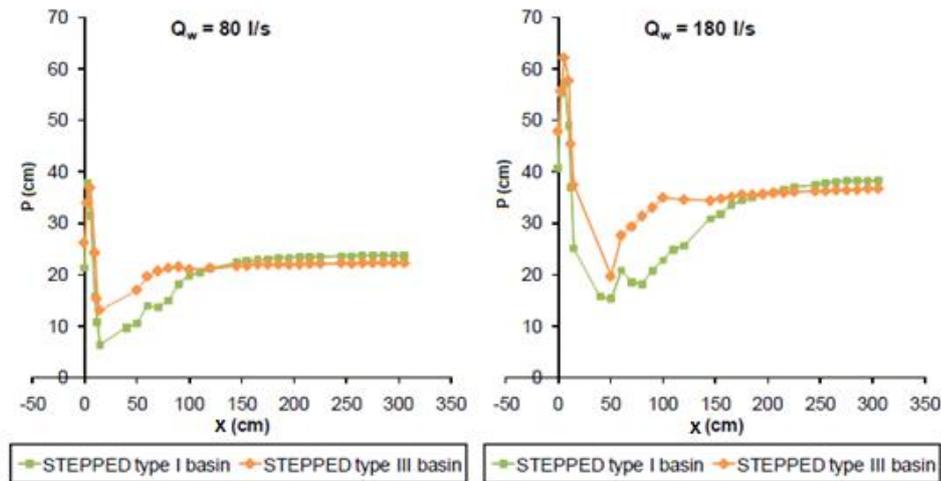


Figura 27: Comparação entre os resultados obtidos no estudo de Meireles *et al.* (2010) e Meireles *et al.* (2005), bacia com acessórios e bacia tipo I, respectivamente.
Fonte: Meireles *et al.* (2010).

Os resultados obtidos em bacia com elementos obtiveram pressões maiores ao longo do ressalto. No entanto o ressalto nessa situação se estabiliza muito mais rápido que na bacia tipo I.

Visando a complementação desse estudo, Meireles *et al.* (2010) salientam a importância de maiores estudos, como calhas de vertedouro de diferentes inclinações e outras alturas de degrau. Salientam também a importância da medição de pressões instantâneas.

Bung *et al.* (2012) também realizaram estudos em bacia de dissipação com elementos a jusante de vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. O estudo foi realizado com bacias tipo III sendo realizados três grupos de testes, sendo o grupo 1 sem blocos de calhas e os grupos 2 e 3 com blocos de calha, de diferentes geometrias, conforme Figura 28.

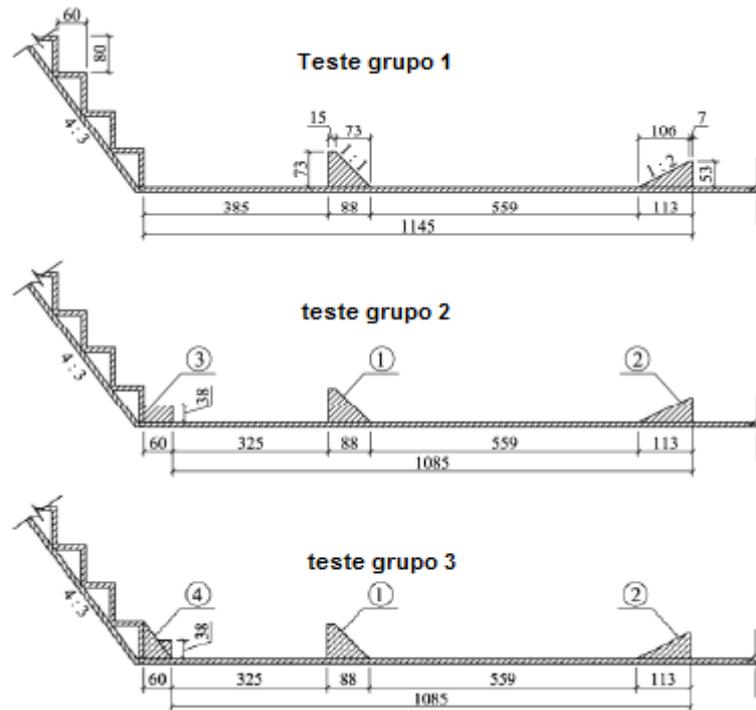


Figura 28: Configurações de bacias tipo III estudadas por Bung *et al* (2012).
Fonte: Bung *et al*. (2012).

Os autores coletaram dados de pressões médias, no centro da bacia, para vazões específicas variando entre 0,08 e 0,20 m³/s/m e alturas críticas entre 0,087 e 0,160 m. As análises foram realizadas com diferentes níveis de jusante, gerando ressalto de diferentes perfis (afogado, livre e iniciando a jusante do pé do vertedouro). Analisando os resultados de pressões os autores concluíram que o uso de blocos de calha (blocos no pé do vertedouro) é dispensável em estruturas com vertedouro em degraus.

Conterato (2014) desenvolveu estudo comparando bacia tipo I (sem acessórios) e bacia com soleira terminal com declividade 1V:1H, para diferentes alturas posicionadas em três pontos distintos na bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus. Analisando dados de flutuações de pressões a montante e jusante da soleira a autora desenvolveu um critério para dimensionamento da altura e da posição ideal em função das condições no início e final do ressalto hidráulico livre.

A autora apresentou uma metodologia para determinar uma altura limite de soleira para que não ocorra escoamento crítico sobre a mesma (denominado escoamento tipo *Weir Flow*) resultando nos valores da Tabela 3 e Figura 29. A autora destaca que esse limite deve ser respeitado.

Tabela 3: Alturas limites calculadas. Fonte: Conterato (2014).

F_1	Y_1 (m)	s limite (m)	s_{lim}/Y_1	s/Y_1^*	s/Y_1 adotado
7,44	0,026	0,16	6,34	9,23	6,34
6,98	0,036	0,21	5,77	6,67	5,77
6,91	0,044	0,25	5,69	5,45	5,45
6,34	0,054	0,27	5,09	4,44	4,44
5,98	0,060	0,28	4,69	4,00	4,00

* relação de s/Y_1 que forneceu a menor flutuação a montante da soleira (dentro da bacia).

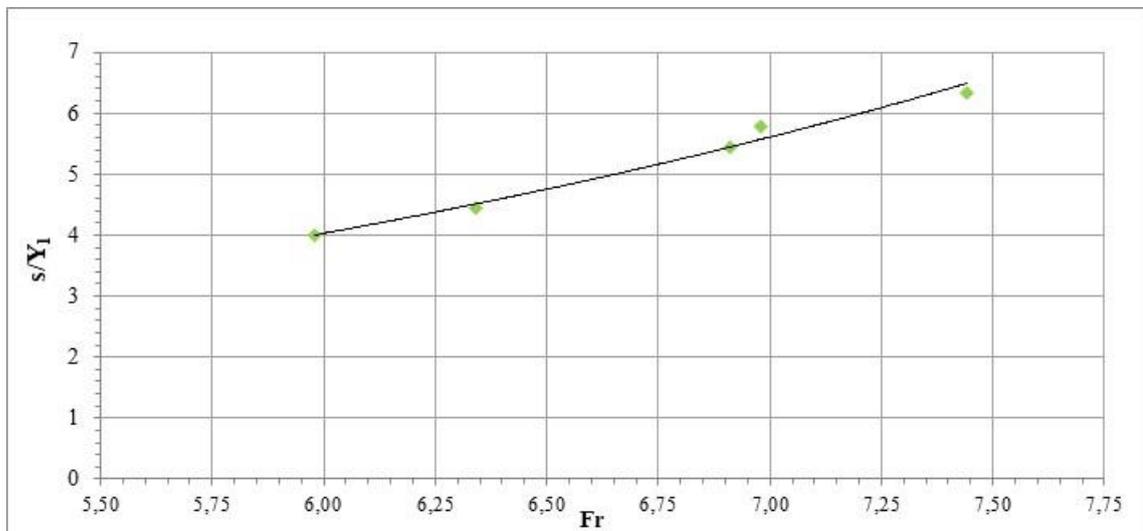


Figura 29: Altura ideal considerando as flutuações a montante da soleira para que as flutuações sejam mínimas e não ocorra escoamento tipo *Weir Flow*. Fonte: Conterato (2014).

A Figura 30 e a Figura 31 mostram os resultados de altura e posicionamento de soleira apresentados por Conterato (2014).

Nas figuras:

- s = altura da soleira;
- L_s = posição da soleira a partir do início da bacia;
- Y_1 = altura rápida;
- Y_2 = altura lenta;
- Fr = número de Froude na entrada da bacia.

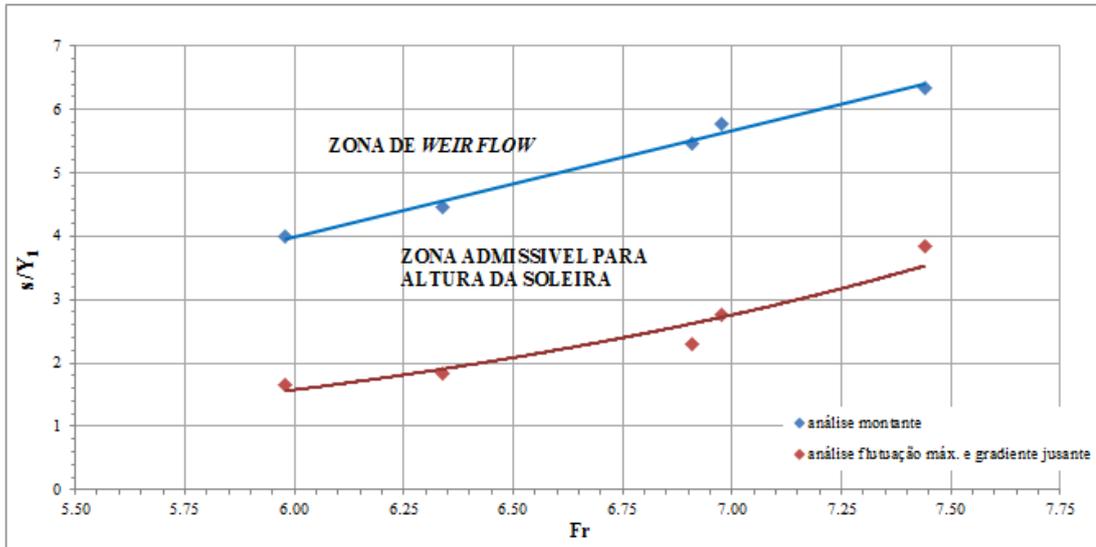


Figura 30: Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude. Fonte: Conterato (2014)

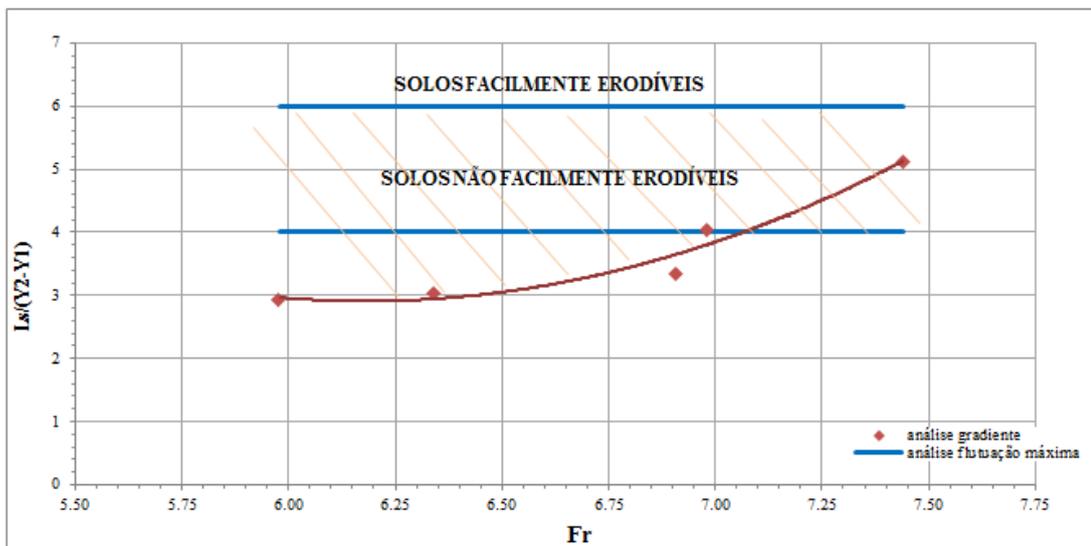


Figura 31: Posição ideal da soleira terminal em função do número de Froude. Fonte: Conterato (2014)

A Figura 32e a Figura 33 apresentam uma comparação entre os resultados encontrados pela autora e demais estudos que estudaram soleiras terminais para diferentes situações.

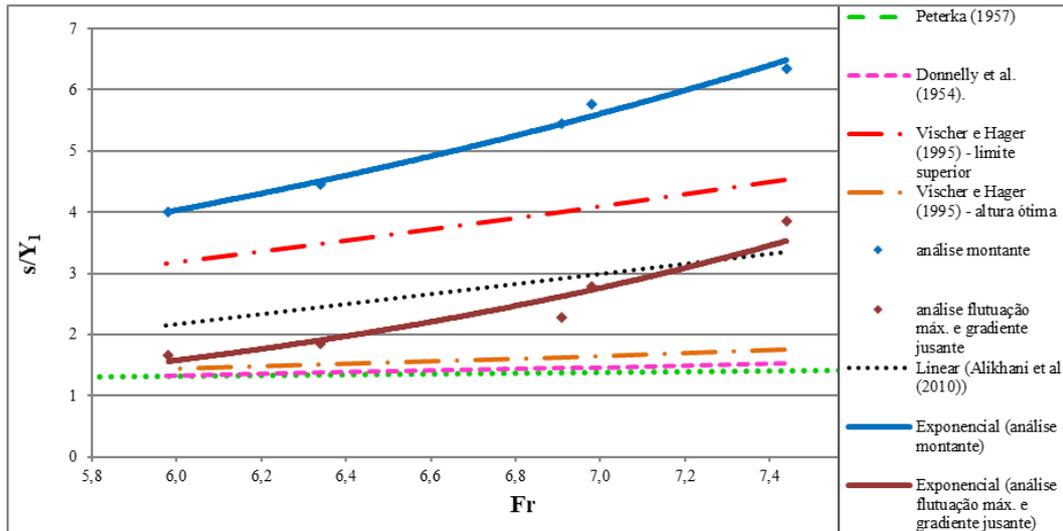


Figura 32: Comparação dos resultados de altura da soleira em relação a outros autores. Fonte: Conterato (2014)

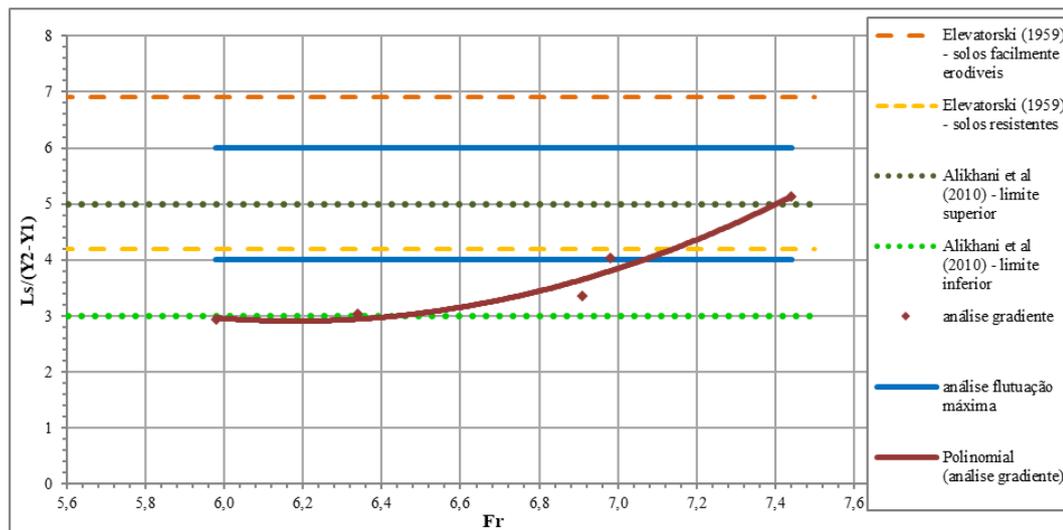


Figura 33: Comparação dos resultados de posição da soleira em relação a outros autores. Fonte: Conterato (2014)

Tajabadi et al (2018) estudaram a influência do ângulo da soleira terminal escalonada em uma bacia de dissipação com blocos de calha e dispersores sobre os parâmetros hidrodinâmicos, como pressão, velocidade, intensidade de turbulência, vorticidade e dissipação de energia, através de modelagem numérica validada através de testes em modelo físico. Os autores estudaram soleiras escalonadas com ângulos de 30, 45, 60 e 90° inseridas em bacias com blocos dispersores, conforme o esquema da Figura 34. Os autores concluíram que em relação à distribuição de pressões, a alteração no ângulo conduz à uma alteração significativa dos valores de pressões médias sobre a soleira. Já, a jusante da bacia, não foram verificadas alterações significativas em função do ângulo e em todos os casos os valores de pressões

médias tendem a se estabilizar, conforme pode ser visto na Figura 35. Em relação à dissipação e energia, os autores salientam que o efeito do ângulo não se torna considerável.

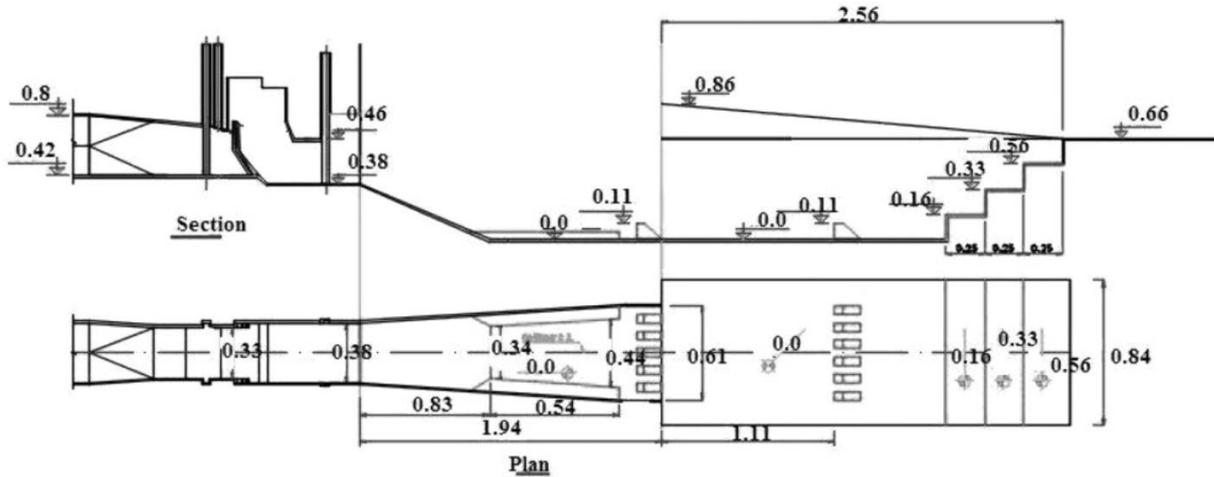


Figura 34: Esquema de modelo utilizado por Tabajadi et al (2018).

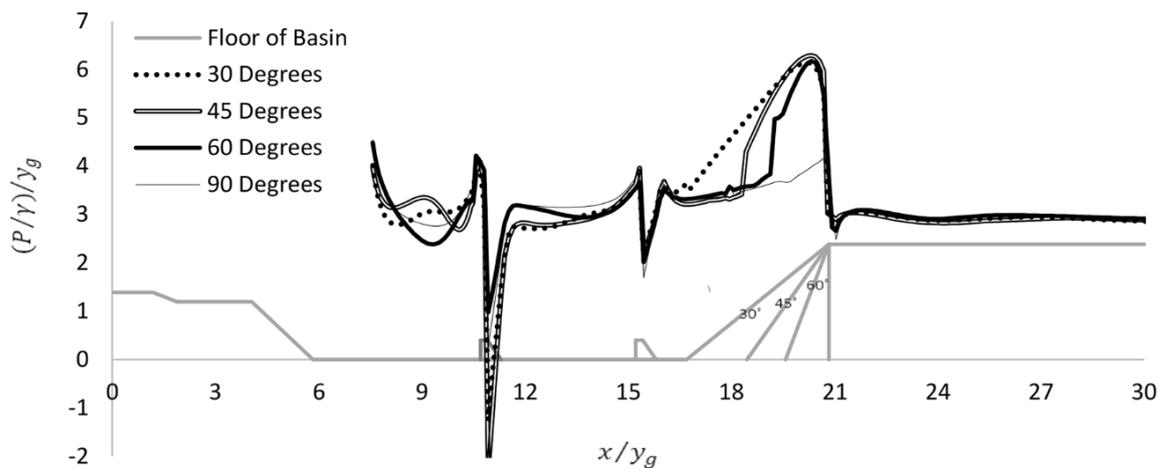


Figura 35: Pressões adimensionalizadas para diferentes ângulos de soleira. Fonte: Tabajadi et al (2018).

No entanto, Marques (1995) estudando a influência do ângulo em dissipadores tipo concha, analisou a influência do ângulo de saída de dissipadores no das flutuações de pressões a jusante e salienta que ao dimensionar estruturas de dissipação, o ângulo de saída (α) é um dos parâmetros mais importantes. O autor coloca que para um projeto de dissipador de energia se deve considerar que:

- o valor da flutuação de pressão na saída do dissipador próximo do fim da soleira deve ser o menor possível;

- o valor médio da flutuação de pressão na região de impacto do jato deve ser tão pequeno quanto possível ou compatível com a resistência do leito;
- a distância em que o jato atinge o fundo a jusante, em relação à extremidade da estrutura, ser a maior possível;
- o custo de construção é o mais baixo possível.

O autor concluiu em suas análises que quando consideramos a economia e a resistência do leito, 20° é um ângulo ideal para a saída de dissipadores.

Fecarotta et al. (2016) estudaram o comportamento de bacias de dissipação com soleira terminal e diferentes tipos de ressalto, variando do submerso até o chamado “Spray”, conforme classificação de Hager and Li (1992). A Figura 36 mostra as situações estudadas. Entre as conclusões os autores ressaltam que o comportamento das flutuações varia com o tipo de ressalto, mas, com exceção do último tipo de ressalto (denominado “Spray”), as flutuações a jusante da bacia apresentam reduções satisfatórias. Os coeficientes de flutuação estão mostrados na Figura 37, onde se pode visualizar o comportamento citado pelos autores.

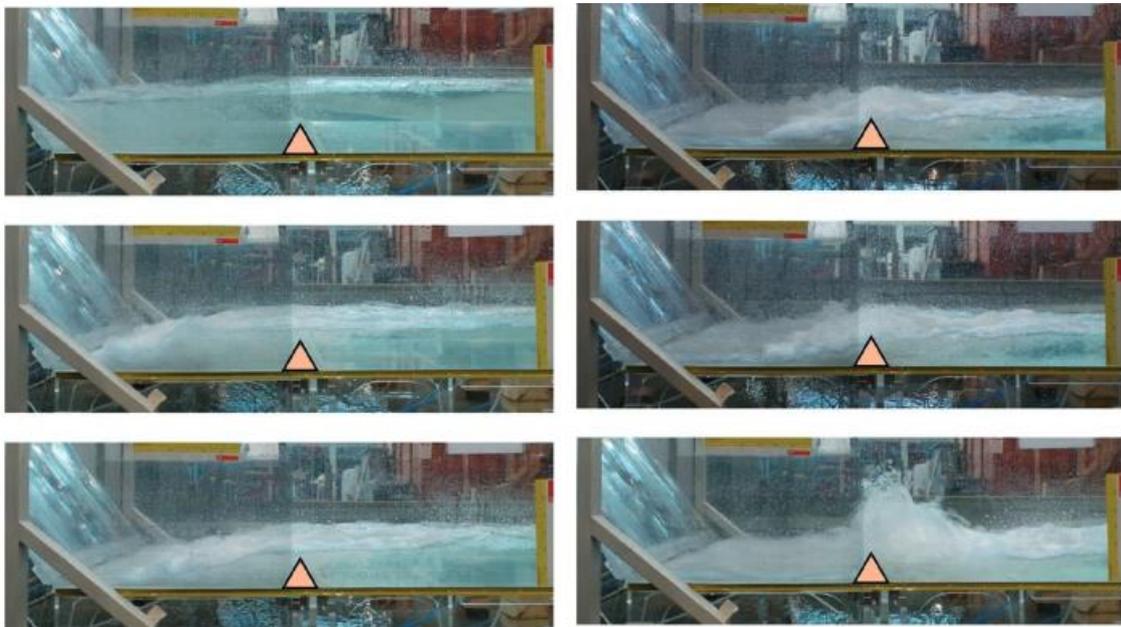


Figura 36: Tipos de ressalto utilizados no estudo realizados para vazão de 26,7 l/s.
Fonte: Fecarotta et al. (2016).

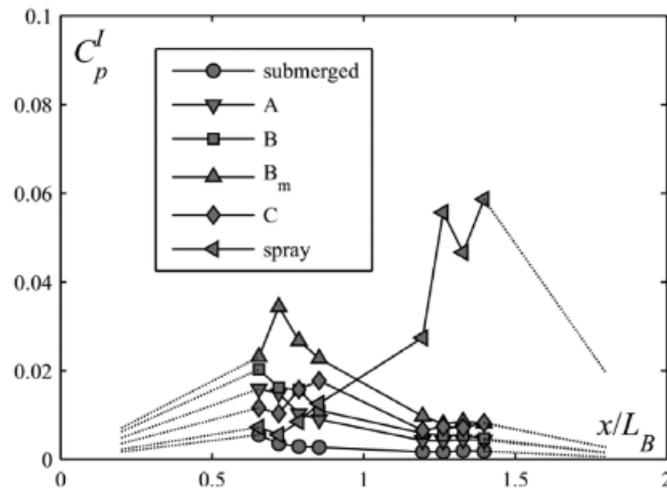


Figura 37: Coeficientes de flutuação de pressão para os diferentes ressaltos estudados. Fonte: Fecarotta et al. (2016).

Padulano et al (2017) estudaram bacias de dissipação com blocos no final da calha e soleira terminal dentada (tipo II na classificação da USBR) para uma faixa de números de Froude entre 8,41 e 31,36 e diferentes tipos de ressalto abordados por Hager and Li (1992). Uma das motivações para o estudo foi entender o comportamento de diferentes tipos de ressalto e o comportamento das flutuações de pressões para cada caso. Entre as conclusões os autores salientam que a eficiência de dissipação aumenta com a diminuição da submersão, de modo que os ressaltos tipo A (que são ressaltos iniciando no pé do vertedouro, sem submersão) são mais eficientes que os ressaltos submersos, que, por sua vez, são mais eficientes que os ressaltos hidráulicos clássicos em bacias não confinadas. Em relação às flutuações de pressão, as maiores submersões (ressaltos submersos e tipo A) apresentam os menores valores. Entre todos os ressaltos analisados, o tipo A provaram ser o tipo de ressalto mais eficiente para bacias de dissipação USBR Tipo II.

Hunt and Kadavy (2021) estudaram bacias de dissipação de diferentes configurações (tipos I, II, III e IV) a jusante de um vertedouro em degraus com declividade 1:3. Os números de Froude estudados variam de 4,1 a 4,6. A Figura 38 apresenta o modelo utilizado pelos autores. Apesar da faixa limitada de vazões os autores concluíram que as mesmas orientações sugeridas por Peterka (1984) são válidas para vertedouro escalonados na configuração estudada. A Figura 39 mostra uma comparação da distribuição de pressões ao longo da bacia e a jusante dela para as configurações estudadas e salienta que os picos foram identificados próximo à soleira.

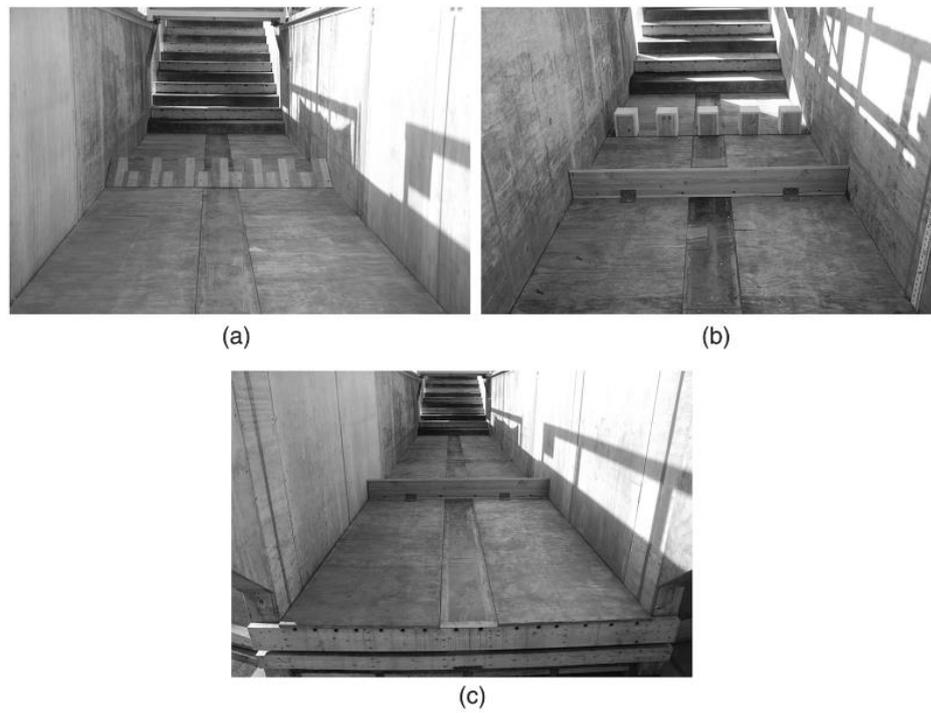


Figura 38: Modelo físico utilizado por Hunt and Kadavy (2021) – bacias tipo (a) II, (b) III e (c) IV.

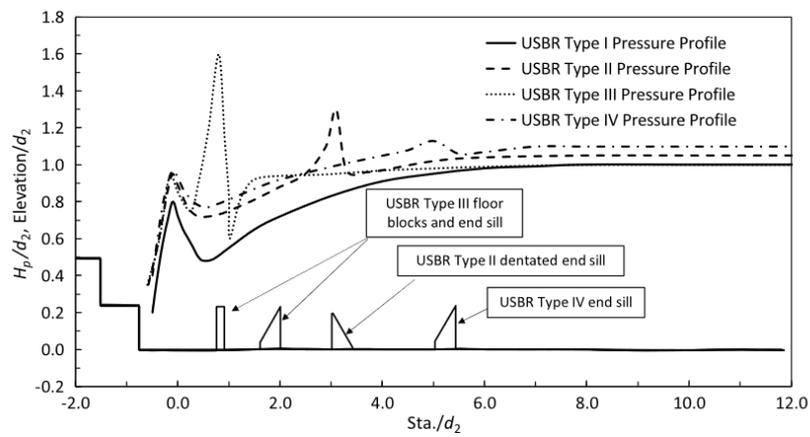


Figura 39: Comparação e pressões relativas obtidas para as diferentes configurações de bacias. Fonte: Hunt and Kadavy (2021)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizada uma estrutura e equipamentos existentes no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O estudo fez parte de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento em parceria com Dona Francisca Energética intitulado “Determinação das características geométricas da soleira terminal em bacias de dissipação a jusante de vertedouro em degraus”. A seguir será apresentado detalhadamente a estrutura e os equipamentos utilizados na aquisição dos dados.

3.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Na reprodução de fenômenos como o ressalto hidráulico em modelos físicos, os efeitos gravitacionais são preponderantes e, portanto, a semelhança baseada em Número de Froude foi respeitada. A estrutura utilizada representa um vertedouro em degraus com canal de aproximação à montante e bacia de dissipação à jusante. A calha possui declividade 1V:0,75H, altura (H_v) de 2,45 m e 0,4 m de largura. No total são 33 degraus com 0,06 m de altura.

A Figura 40 representa um esquema geral do modelo utilizado, desde o sistema de alimentação, até o canal de jusante. De maneira geral, a estrutura é constituída por placas metálicas e chapas de acrílico transparente. Ao longo de toda a estrutura forma previstos pontos para instalação de medidores de pressões médias e/ou pressões instantâneas. A Figura 41 mostra imagens do modelo.

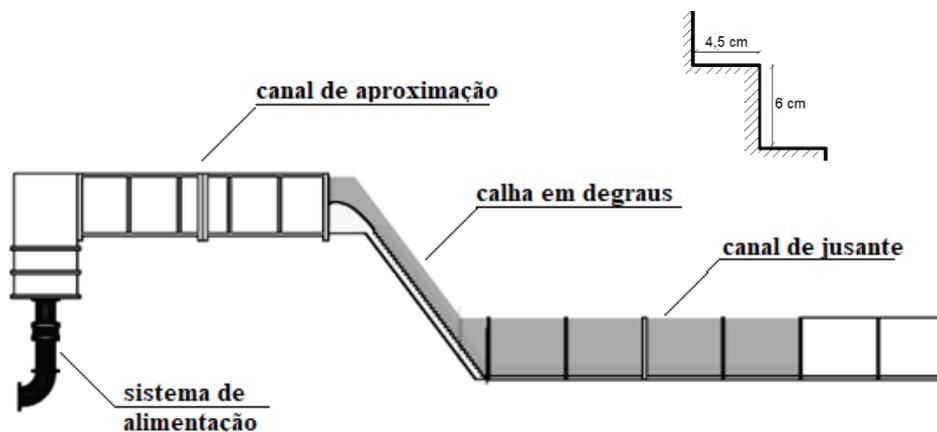


Figura 40: Esquema geral do modelo utilizado.



Figura 41: Modelo instalado no LOH/IPH.

A alimentação do modelo é realizada por reservatório inferior através de sistema de bombeamento composto por conjunto motor-bomba de 75CV operado em conjunto com inversor de frequência, sendo assim possível ajustar as vazões conforme as necessidades experimentais. Para medição de vazões foi utilizado um conjunto composto por um transmissor de vazão eletromagnético *Rosemount 8732* com sensor de medição 8705/8707 com precisão de $\pm 0,18\%$, instalado no sistema de alimentação, à montante do canal de aproximação.

A montante do vertedouro há um trecho de 5 m de comprimento e um reservatório, construído para que ocorra tranquilização do escoamento. A medição do nível de jusante é realizada através de piezômetro instalado a montante de uma comporta que auxilia no controle de nível.

As soleiras terminais utilizadas foram projetadas e executadas em chapas metálicas possibilitando posteriormente a remoção para fixação em diferentes locais dentro da bacia permitindo o estudo de diferentes configurações. Foram utilizadas soleiras terminais de 3 diferentes declividades, 3 diferentes alturas posicionadas em 3 pontos dentro da bacia de dissipação com o intuito de analisar diferentes situações em relação às posições características do ressalto hidráulico. As posições foram relacionadas com a altura do vertedouro (H), buscando posicionamentos em diferentes regiões do ressalto hidráulico para a faixa de vazões ensaiada.

Como o trabalho faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento, está associado a outros trabalhos, entre eles o desenvolvido em Conterato (2014). Na ocasião, foi analisada a condição de soleira com declividade 1H:1V no mesmo modelo físico para a mesma faixa de vazões e considerando as mesmas variações de altura e posição de soleira. Os dados nessa condição foram incluídos no presente estudo para fins de comparação com as outras duas declividades e, portanto, foi seguida a mesma metodologia de análise. A Tabela 4 apresenta os ângulos de cada uma das soleiras estudadas.

Tabela 4: Ângulo de cada soleira terminal utilizada na análise.

Declividade (V:H)	ângulo (°)
1V:1H	45,0
1V:2H	26,6
1V:3H	18,4

A Tabela 5 mostra um resumo das condições de ensaio e a Figura 42 e Figura 43 mostram as geometrias e posicionamento das soleiras terminais na bacia, incluindo a condição estudada em Conterato (2014).

Tabela 5: Características das soleiras estudadas e posicionamento delas na bacia de dissipação

CARACTERÍSTICA DA SOLEIRA		POSICIONAMENTO NA BACIA		
DECLIVIDADE	ALTURA DA SOLEIRA (cm)	1H	1/2H	2/3H
1V:1H	10	X	X	X
	12	X	X	X
	18	X	X	X
1V:2H	10	X	X	X
	12	X	X	X
	18	X	X	X
1V:3H	10	X	X	X
	12	X	X	X
	18	X	X	X

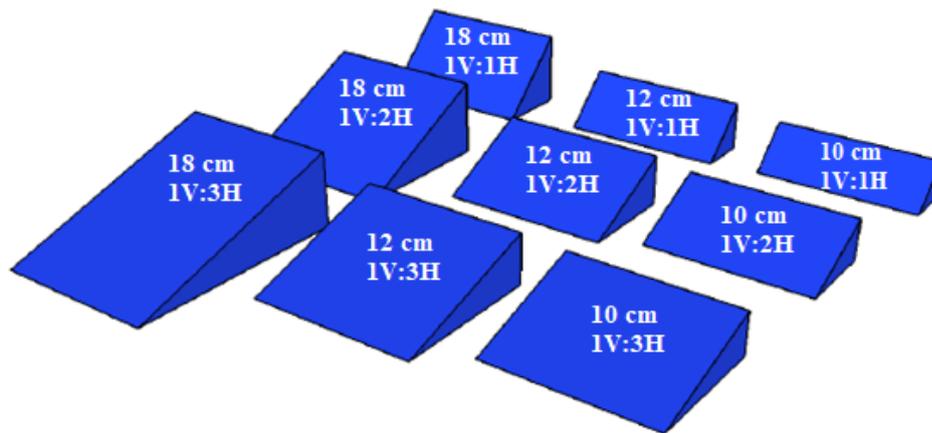


Figura 42: Ilustrações das soleiras utilizadas.

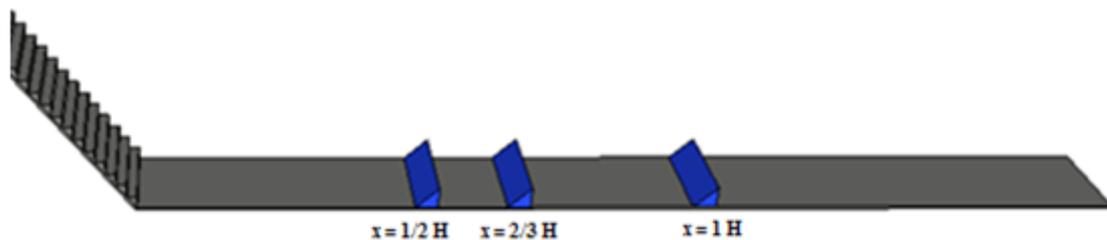


Figura 43: Esquema mostrando as três diferentes posições dentro da bacia. Fonte: adaptado de Conterato (2014).

Cada condição da Tabela 5 foi ensaiada para 5 vazões diferentes mostradas na Tabela 6. Em cada condição foi ajustado visualmente o nível de jusante correspondente à submergência $S=1$ em bacia do tipo I (sem soleiras), assim é possível analisar também a influência do posicionamento da soleira para um mesmo nível de jusante. A faixa de vazões foi limitada pela capacidade do sistema de bombeamento existente no laboratório.

Tabela 6: Dados de vazões ensaiadas

VAZÃO (l/s)	40	60	80	100	110
VAZÃO ESPECÍFICA (m³/s/m)	0,100	0,150	0,200	0,250	0,275
NÚMERO DE FROUDE RUGOSO (DO DEGRAU) (Fr*)	5,22	7,85	10,45	13,07	14,37
NÚMERO DE FROUDE NA ENTRADA DO RESSALTO (Fr₁)	7,44	6,98	6,91	6,34	5,98
NÍVEL DE JUSANTE (m)	0,27	0,34	0,41	0,46	0,48

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS

Foram coletados dados visuais de comportamento de escoamento além de dados de pressões instantâneas através de transdutores de pressão instalados no fundo da bacia de dissipação em

24 pontos distribuídos no centro do canal. A Figura 44 mostra um esquema do posicionamento das tomadas em planta.

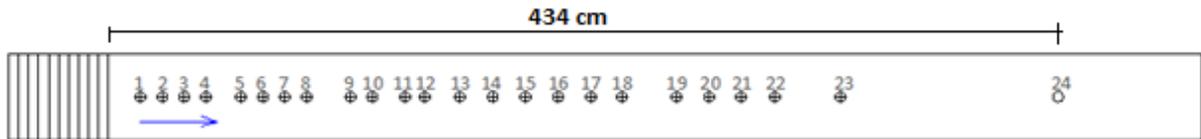


Figura 44: Detalhe do posicionamento das tomadas de pressão junto ao fundo do canal. Fonte: Conterato (2014).

Os transdutores utilizados são da marca Sitron (SP96). No total 23 possuem faixa de trabalho de -1,5 a 1,5 m.c.a. e 1 com faixa de -1,5 a 3,0 m.c.a. (primeira tomada de pressão). Ambos os modelos possuem erro esperado de +/- 0,5% do fundo de escala. Os transdutores foram ligados a um concentrador de sinais que transmitia os dados para um conversor analógico/digital da marca *National Instruments* modelo USB-6225, mostrado na Figura 45. Foram coletadas amostras de 8 minutos à frequência de aquisição de 256 Hz.

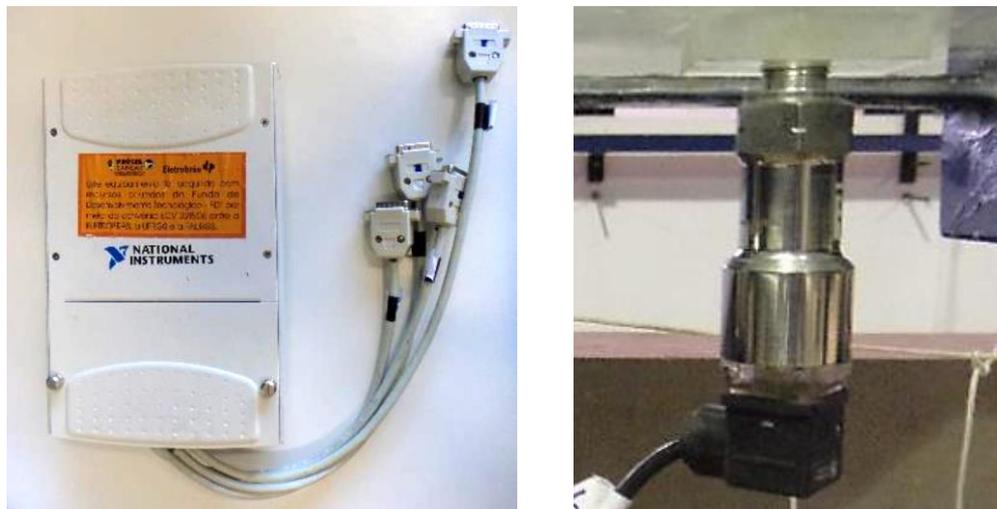


Figura 45: Placa de aquisição e transdutor utilizado.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

A análise de dados foi realizada seguindo o proposto em Conterato (2014), considerando o comportamento das flutuações de pressão a montante e a jusante da soleira para discutir a influência da declividade da soleira nos resultados. Para análise e comparação desses dados foi utilizada a metodologia proposta por Marques et al. (1997), já mencionada anteriormente

na Equação 18. A seguir é apresentada a metodologia para análise a montante e a jusante da bacia.

3.3.1 Análise dos valores de pressões e suas flutuações à montante da soleira

O comportamento das pressões e suas flutuações dentro da bacia foram analisados buscando entender a influência do posicionamento da soleira no comportamento do ressalto. De Conterato (2014) se sabe que existe uma altura de soleira limite para que o nível do escoamento sobre a soleira não atinja a altura crítica. A análise foi realizada considerando o comportamento das pressões médias, flutuações e linha d'água, buscando principalmente verificar se a declividade da soleira influenciou nos resultados para altura limite.

3.3.2 Análise dos valores de máxima flutuação a jusante da soleira terminal

A jusante da soleira, conforme já mencionado, verifica-se um ponto máximo de flutuações de pressões. A Figura 46 apresenta um exemplo de como foi considerado esse ponto de máximo para uma das condições de estudadas (posição, declividade e altura). Na figura, a distância está referenciada ao início da bacia de dissipação.

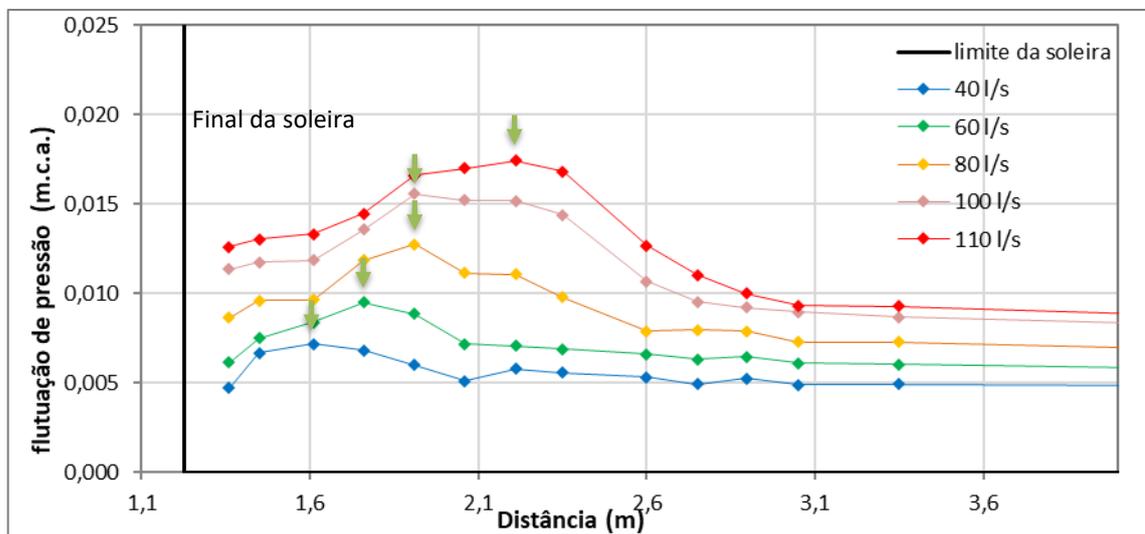


Figura 46: Detalhe da distribuição longitudinal das flutuações de pressões a jusante da bacia com soleira de 12 cm de altura na posição $1/2H$, para todas as vazões ensaiadas.

Para cada caso foi extraído o valor desse ponto considerado crítico além da posição em que o mesmo ocorreu em relação ao pé da soleira. Parte da análise foi baseada na determinação da situação que apresentou o menor risco em relação às flutuações, sem considerar a distância

em que o mesmo ocorreu em relação à estrutura. Outra análise foi realizada buscando avaliar não apenas a magnitude da flutuação de pressão máxima mas também a influência da distância em que ela ocorre em relação à soleira. Para isso foi realizada a análise do coeficiente Ω , chamado aqui simplesmente de gradiente, conforme a Equação 22

$$\Omega = \frac{\sigma_{p_{m\acute{a}x}}}{\Delta x_{p_{m\acute{a}x}}} \quad \text{Equação 22}$$

Onde:

$\sigma_{p_{m\acute{a}x}}$ = máximo valor de flutuação adimensionalizada a jusante da soleira (conforme Marques et al. (1997));

$\Delta x_{p_{m\acute{a}x}}$ = distância adimensionalizada conforme Marques et al. (1997), medida entre o pé da soleira terminal e o ponto de máxima flutuação.

Ω = relação entre o valor de máxima flutuação de pressão a jusante da soleira e a distância em que ocorre em relação a soleira (gradiente).

A altura da soleira foi adimensionalizada pela altura rápida do ressalto hidráulico livre, para cada vazão conforme a equação abaixo. Os resultados estão apresentados na Tabela 7.

$$\text{altura relativa} = \frac{s}{Y_1} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

s = altura da soleira (m);

Y_1 = altura conjugada rápida (m).

Tabela 7: Valores de alturas de soleira adimensionalizados (alturas relativas) em função da altura rápida para cada número de Froude.

Fr₁	7,44	6,98	6,91	6,34	5,98
Y₁ (m)	0,026	0,036	0,044	0,054	0,060
s = 0 cm	0	0	0	0	0
s = 10 cm	3,85	2,78	2,27	1,85	1,67
s = 12 cm	4,62	3,33	2,73	2,22	2,00
s = 18 cm	6,92	5,00	4,09	3,33	3,00
s = 24 cm	9,23	6,67	5,45	4,44	4,00

As posições das soleiras foram adimensionalizadas pelas alturas conjugadas, também seguindo a metodologia proposta por Marques et al. (1997), conforme equação abaixo. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

$$posição\ relativa = \frac{L_s}{(Y_2 - Y_1)} \quad \text{Equação 24}$$

Tabela 8: Posicionamento das soleiras adimensionalizados (posições relativas)

Fr	Y₂	Y₁	Posição 1/1 H	Posição 2/3 H	Posição 1/2 H
7,44	0,27	0,026	10,27	6,83	5,13
6,98	0,34	0,036	8,09	5,38	4,04
6,91	0,41	0,044	6,71	4,47	3,36
6,34	0,46	0,054	6,05	4,03	3,03
5,98	0,48	0,06	5,86	3,90	2,93

* posição adimensionalizada com $L_s/(Y_2 - Y_1)$, sendo L_s equivalente à posição x .

Nas análises foram incluídos os resultados de bacias de dissipação sem soleira terminal (tipo I). Para permitir a comparação, esse caso foi considerado com soleira de altura “zero” ($s=0$). Em relação à posição do valor máximo de flutuação à jusante, foi considerado o valor ocorrendo na posição 1 ($Y_2 - Y_1$) a partir do final da bacia, para os três comprimentos estudados.

4 ANÁLISES DOS RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos objetivando caracterizar o comportamento do ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouros em degraus para a diferentes situações de soleiras terminais triangulares, além de propor um critério para dimensionamento desta soleira.

4.1 COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES E SUAS FLUTUAÇÕES AO LONGO DA BACIA DE DISSIPACÃO E A JUSANTE DELA

Durante os ensaios foram observadas diferenças na linha d'água do escoamento na bacia e a jusante dela conforme a declividade (ângulo da soleira). A Figura 47, Figura 48 e Figura 49 mostram o escoamento para vazão de 80 l/s em três situações. Nas figuras a soleira utilizada possui altura de 10 cm com três diferentes declividades sendo fixada na posição $1/2 H_v$ (122,5cm a partir do início da bacia).



Figura 47: Escoamento em bacia com soleira de 10 cm de altura, declividade 1V:3H, na posição $1/2 H_v$ (122,5cm).

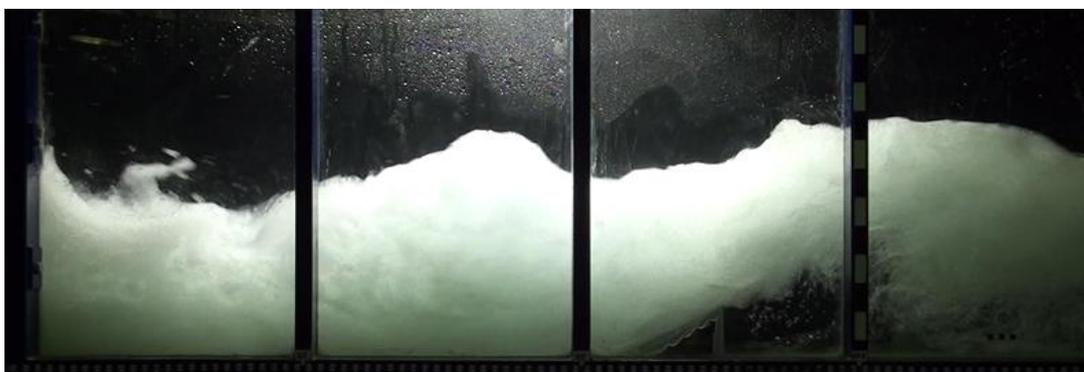


Figura 48: Escoamento em bacia com soleira de 10 cm de altura, declividade 1V:2H, na posição $1/2 H_v$ (122,5cm).

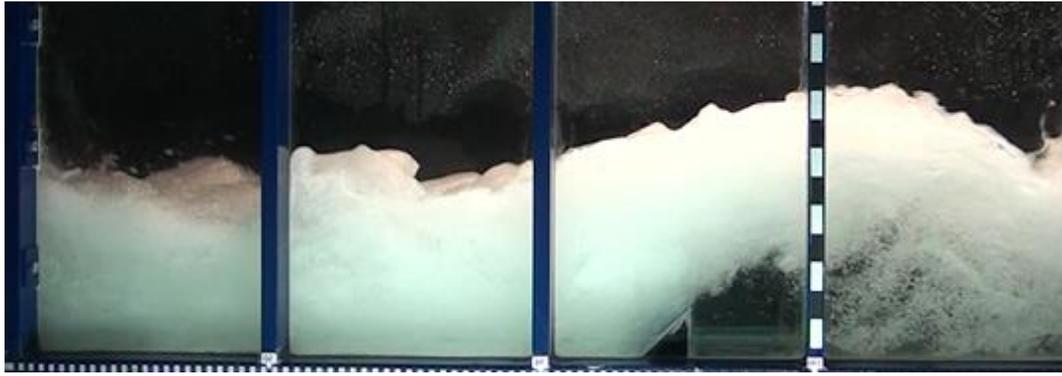


Figura 49: Escoamento em bacia com soleira de 10 cm de altura, declividade 1V:1H, na posição $1/2 H_v$ (122,5cm). Fonte: Conterato (2014)

Nas figuras anteriores é possível verificar que o nível na bacia tende a aumentar conforme aumenta a declividade da soleira. A soleira com declividade 1V:3H apresenta o menor nível d'água na bacia, explicando os resultados de pressões médias obtidos a seguir. A jusante da bacia se pode observar que quanto maior o ângulo a declividade, maior altura atinge o jato lançado pela soleira.

A seguir serão apresentados resultados de dados de pressões médias para diferentes situações. Os resultados para as demais variações de posição e altura estão apresentados no Anexo I. A Figura 50 mostra os resultados para as cinco vazões estudadas, com soleira de 12 cm de altura, inclinação 1V:2H, posicionada a uma distância $1/2 H_v$ (122,5 cm) a partir do início da bacia. A Figura 51 mostra os mesmos resultados para a mesma soleira posicionada a uma distância $2/3 H_v$ (163,3 cm) a partir do início da bacia.

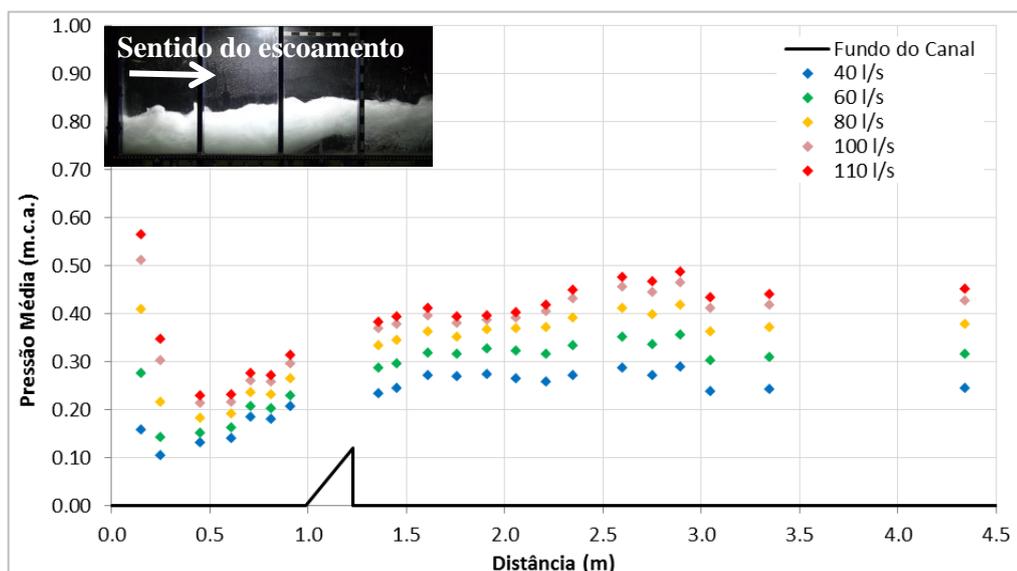


Figura 50: Resultados de pressões médias para soleira de 12 cm na posição $1/2 H_v$ (122,5cm), inclinação 1V:2H.

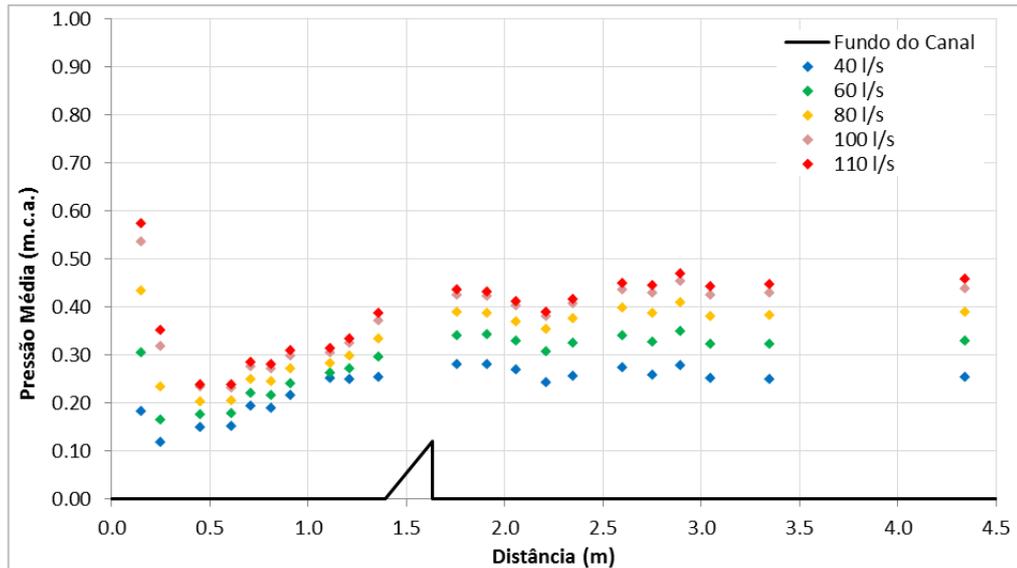


Figura 51: Resultados de pressões médias para soleira de 12 cm na posição $2/3 H_v$ (163,3cm), inclinação 1V:2H.

Nas duas figuras se pode verificar, conforme esperado, aumento da pressão média conforme aumenta a vazão. A jusante da soleira se pode observar uma leve perturbação do escoamento, possivelmente devido ao percurso e impacto do escoamento lançado pela soleira. Observa-se que, mesmo para posições diferentes de soleira, os valores máximos de pressões médias a jusante da estrutura ocorrem em posições parecidas.

A seguir são apresentados gráficos para uma situação de altura e posição de soleira, destacando que as demais situações seguem comportamento semelhante. Em cada um dos gráficos estão representadas, para uma mesma vazão, as pressões médias para soleiras de 12 cm de altura posicionadas a $2/3 H_v$ (1,63 m) do início da bacia com 3 inclinações diferentes: 1V:1H, 1V:2H e 1V:3H. Em todos os gráficos os dados são comparados com bacias sem acessórios (bacia tipo I).

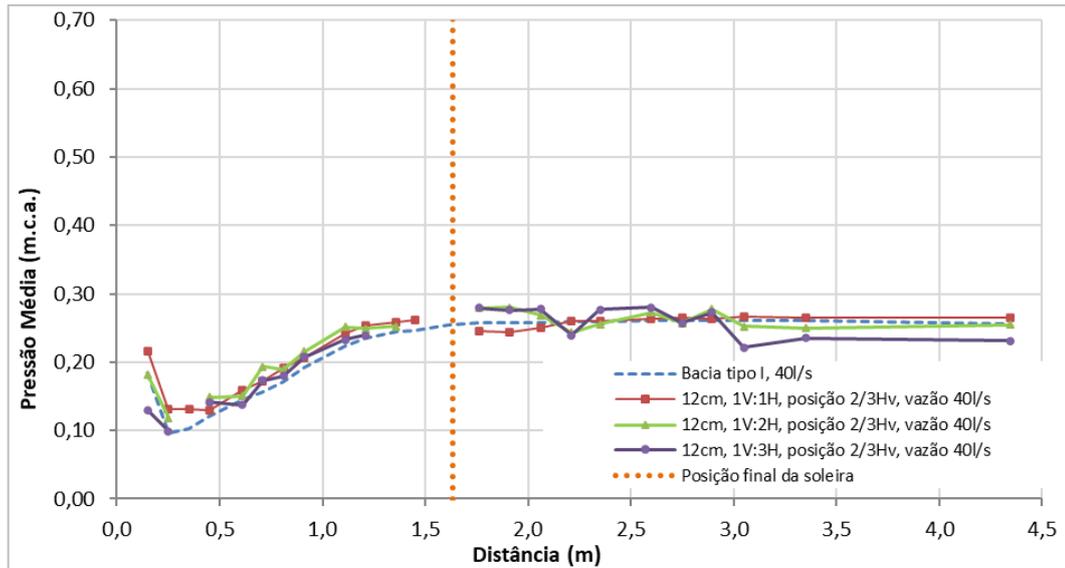


Figura 52: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 40 l/s em comparação com bacia tipo I.

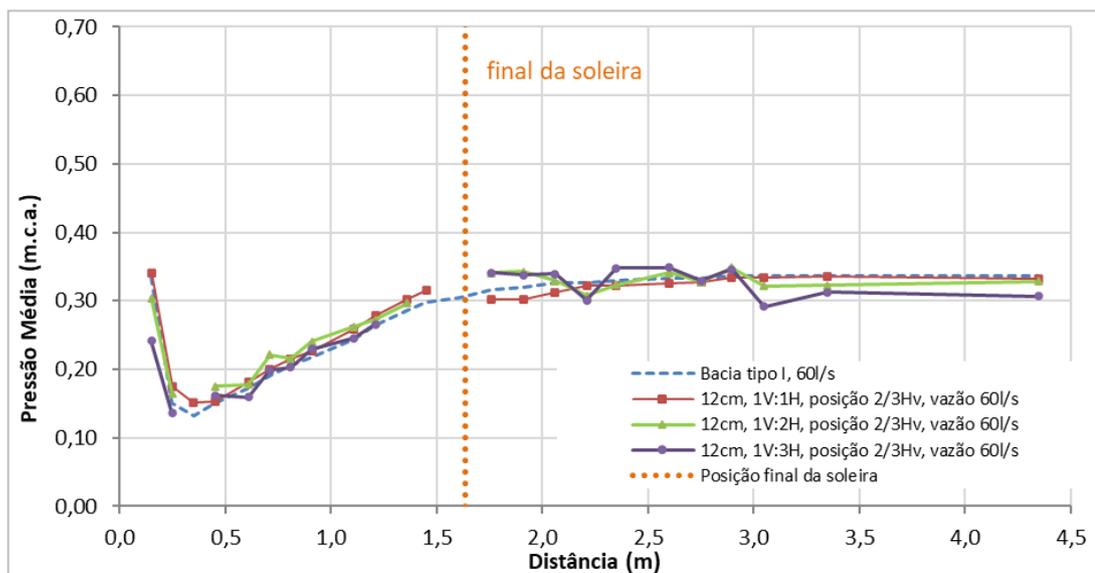


Figura 53: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 60 l/s em comparação com bacia tipo I.

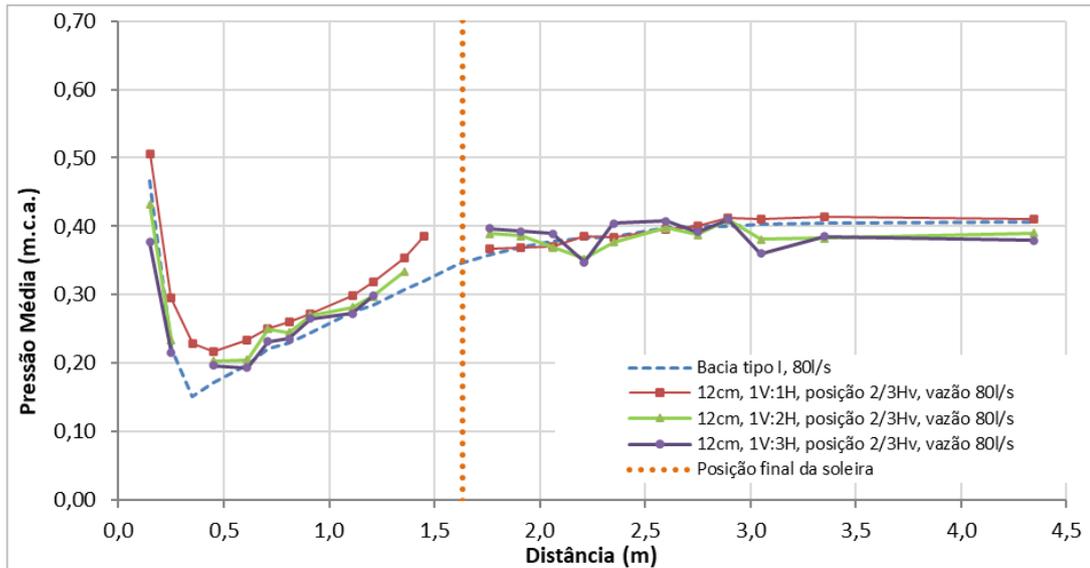


Figura 54: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 80 l/s em comparação com bacia tipo I.

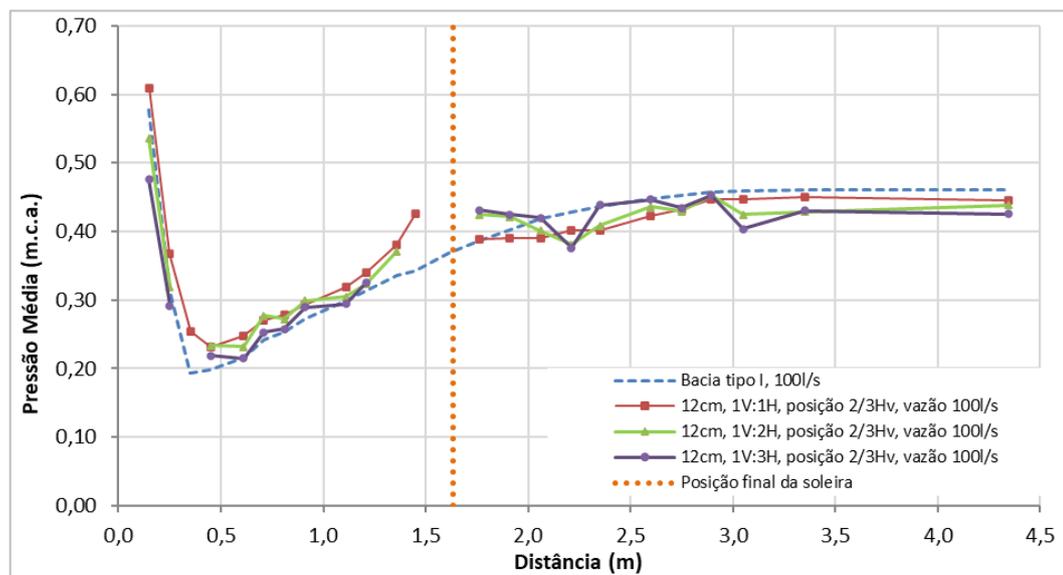


Figura 55: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 100 l/s em comparação com bacia tipo I.

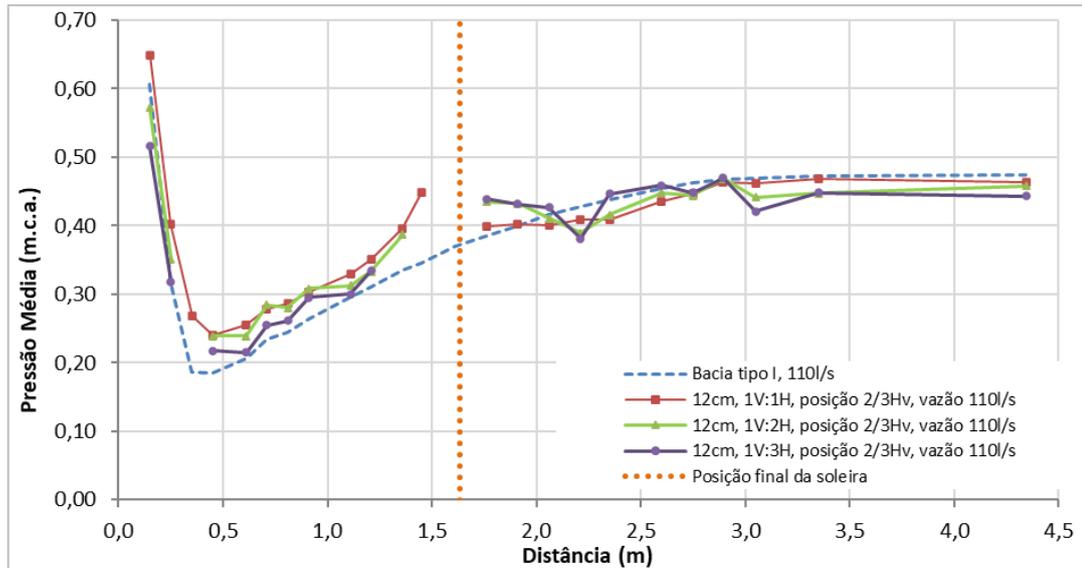


Figura 56: Resultados de pressão média na bacia com soleira de diferentes inclinações para vazão de 110 l/s em comparação com bacia tipo I.

Da Figura 52 a Figura 56 é possível observar que no interior da bacia (montante da soleira) ocorre um aumento dos valores de pressão média em relação à bacia tipo I (sem soleira), sendo esse aumento mais significativo quanto maior a declividade da soleira. A jusante percebe-se que quanto menor a declividade da soleira, menores são as pressões médias, tendendo a valores menores que as pressões na bacia tipo I, resultado semelhante ao que pode ser observado nos gráficos de comportamento de pressões médias apresentados por Cardoso (2006).

A declividade 1V:3H apresenta um comportamento mais disperso em relação às demais situações. O jato lançado pela soleira com essa declividade apresenta um ângulo menor, tendendo à uma trajetória mais próxima à superfície do que as outras situações. Essa trajetória do jato causa maior perturbações a longo do comprimento analisado.

Para as mesmas condições anteriores, são apresentados os resultados de flutuações de pressão (Figura 57 e Figura 58). Os resultados para as demais variações estão apresentados no Anexo II. Cabe salientar que a soleira se encontra em escala real nos gráficos, ficando distorcida conforme as escalas adotadas nos eixos.

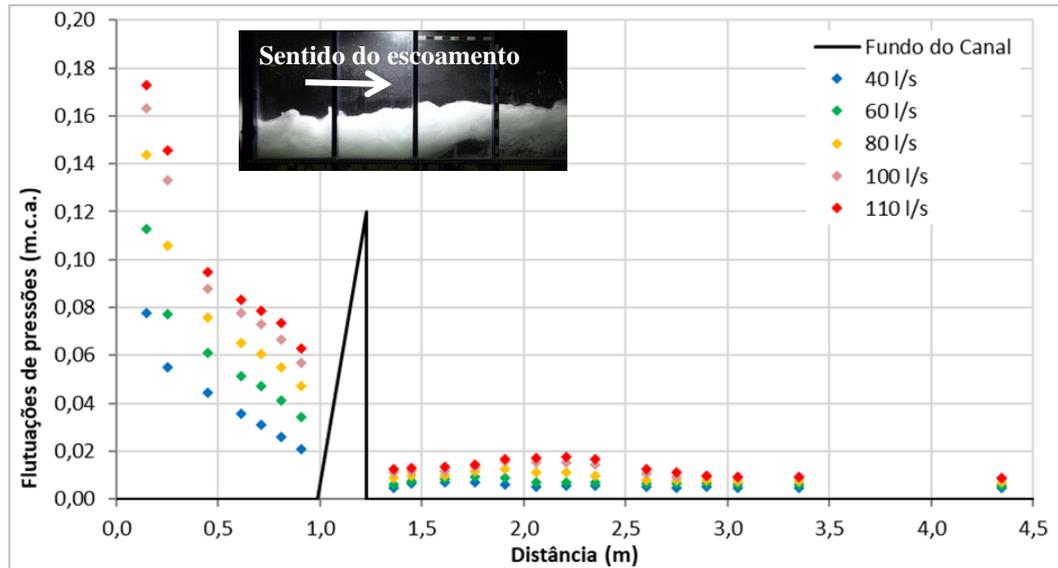


Figura 57: Resultados de flutuações de pressão para soleira de 12 cm na posição $1/2 H_v$ (122,5cm), inclinação 1V:2H.

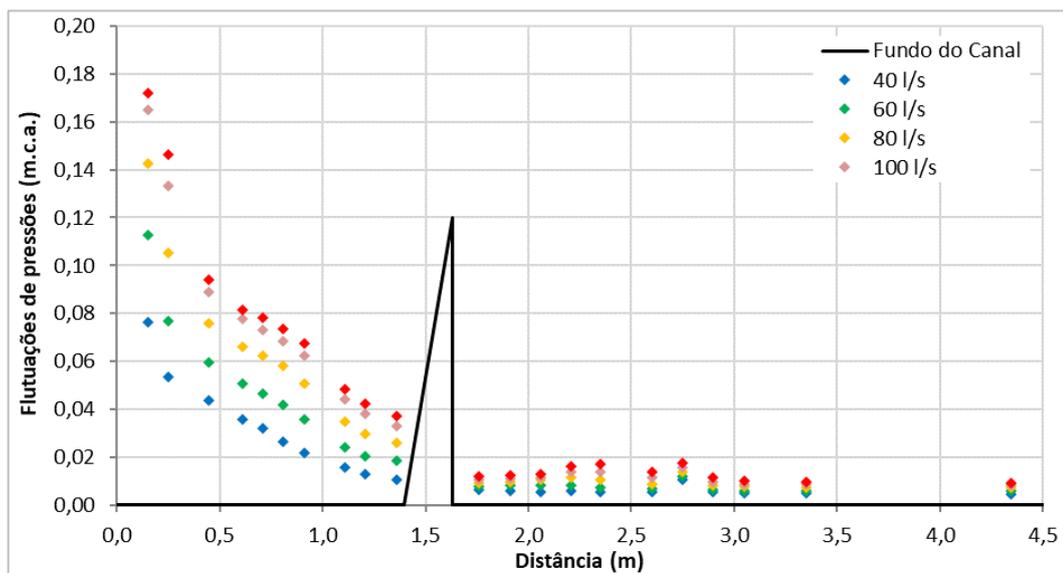


Figura 58: Resultados de flutuações de pressão para soleira de 12 cm na posição $2/3 H_v$ (163,3cm), inclinação 1V:2H.

Analisando os resultados de flutuações se observa que na bacia, independentemente da posição, as flutuações são maiores no início da bacia de dissipação e diminuem em direção à soleira. Percebe-se que a jusante da soleira as flutuações apresentam uma queda, provavelmente pela existência de uma zona de recirculação logo a jusante da mesma. Logo após essa queda se observa um aumento causando um leve pico devido ao impacto do jato lançado pela soleira. Em todas as situações é verificada essa característica, ficando mais evidente para as soleiras posicionadas mais próximas ao início da bacia.

4.2 ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO À MONTANTE DA SOLEIRA (NA BACIA DE DISSIPAÇÃO)

O afogamento artificial causado pela inserção da soleira contribui na estabilização do escoamento no interior da bacia. Da mesma forma que apontado por Conterato (2014), existem casos em que a altura acima da soleira atinge a altura crítica (citado como escoamento do tipo *Weir flow*). Analisando visualmente o escoamento, se pode perceber que, da mesma forma que para a declividade 1V:1H, as soleiras de 18 cm de altura para número de Froude de 7,44 resultou nesse tipo de escoamento. Na Figura 59 é possível observar o escoamento para soleira de 18 cm e número de Froude 7,44, com declividade de soleira 1V:3H.



Figura 59: Escoamento sobre a soleira com declividade 1V:3H, altura 18 cm e número de Froude 7,44.

Portanto, o limite estabelecido por Conterato (2014) é considerado válido no presente estudo, já que nos ensaios foi verificado que as mesmas situações de altura de soleira apresentaram escoamento tipo *Weir Flow*.

Para uma análise completa é necessário a análise da situação a jusante da soleira em conjunto. A seguir são apresentados os resultados obtidos analisando a flutuação de pressão a jusante da bacia de dissipação.

4.3 ANÁLISE DA FLUTUAÇÃO DE PRESSÃO À JUSANTE DA SOLEIRA

Conforme já apresentado, a inserção de soleiras terminais influencia no comportamento das flutuações de pressão ao longo da bacia e a jusante dela. No presente estudo buscou-se

analisar esse comportamento para ser possível propor critérios para dimensionamento seguro dessas estruturas.

A jusante da bacia se percebe que o escoamento apresenta uma zona de recirculação e uma zona de impacto do jato de escoamento lançado pela soleira terminal. A Figura 60 detalha visualmente essas duas regiões.

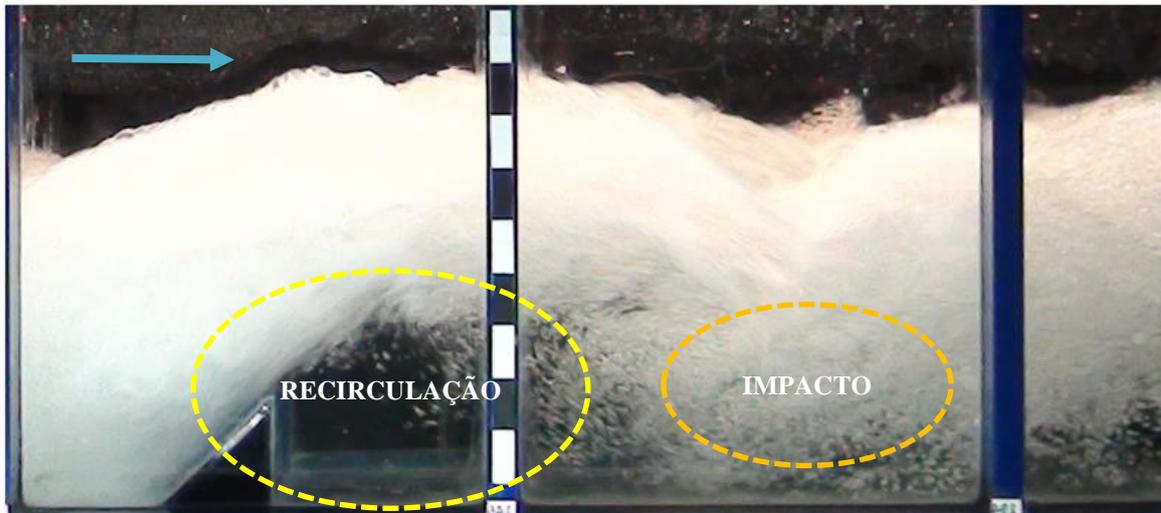


Figura 60: Imagem detalhando o escoamento a jusante de uma soleira terminal (zona de recirculação e impacto do jato lançado pela soleira).

O impacto do jato gera um aumento das flutuações de pressão que, dependendo da magnitude e da distância em que ocorrem em relação à soleira, podem comprometer a estrutura da bacia além de causar danos ao leito natural do rio. Seguindo a metodologia proposta em Conterato (2014), foi realizada aqui análise considerando a flutuação máxima encontrada a jusante da soleira para cada situação e também incluído a distância que ela ocorre em relação à soleira (gradiente), conforme detalhado na metodologia. A seguir serão detalhados os resultados dessas análises.

4.3.1 Resultados da análise considerando a flutuação máxima a jusante da soleira

Uma primeira análise foi realizada buscando compreender o comportamento dos valores de flutuação máxima a jusante da soleira, independente da distância em que os mesmos acontecem em relação ao final da estrutura. Para facilitar a entendimento, para cada número de Froude, em cada uma das declividades de soleira, foram plotados os menores valores de flutuação máxima para as 3 posições, conforme exemplificado na Figura 61 e Figura 62. Os

demais resultados podem ser visualizados no Anexo III. Os valores de flutuação mostrados aqui são adimensionalizados ($\sigma_{\text{pmáx}}$).

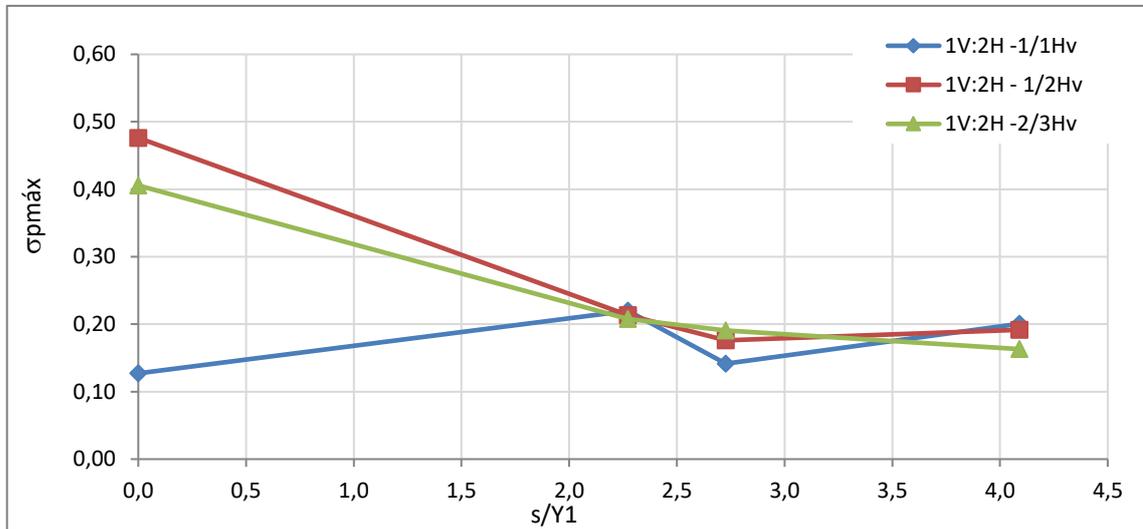


Figura 61: Valores adimensionalizados de máxima flutuação ($\sigma_{\text{pmáx}}$) em função da altura adimensionalizada da soleira ($s/Y1$) para as 3 posições e $Fr = 6,91$, com soleira na declividade 1V:2H.

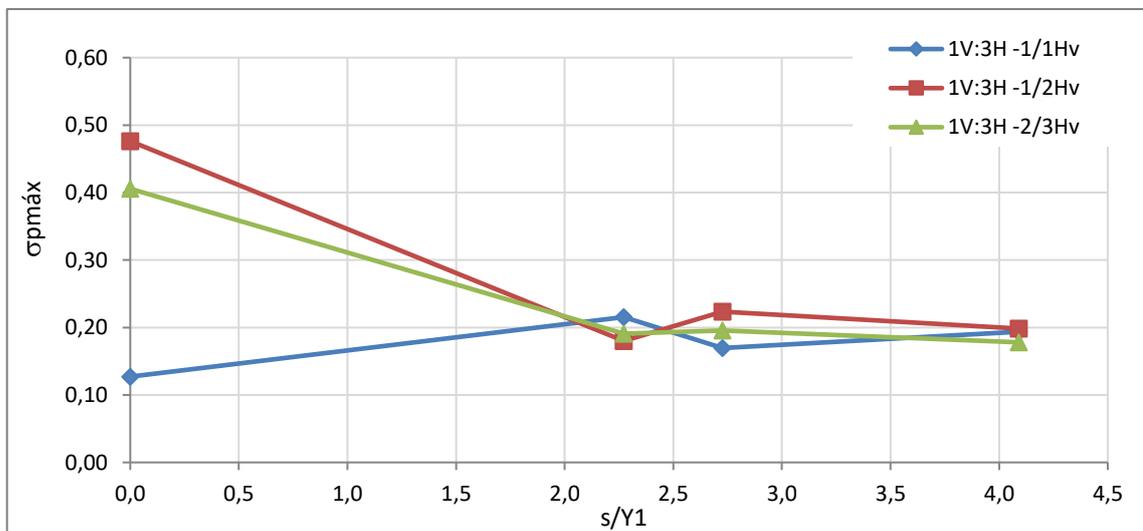


Figura 62: Valores adimensionalizados de máxima flutuação ($\sigma_{\text{pmáx}}$) em função da altura adimensionalizada da soleira ($s/Y1$) para as 3 posições e $Fr = 6,91$, com soleira na declividade 1V:3H.

Assim como os dois exemplos analisados, nos gráficos é possível observar, para cada posição, a altura que resultou no menor valor de flutuação máxima. As situações em que a altura crítica sobre a soleira ocorre, citadas anteriormente, foram descartadas das análises.

a) Análise considerando os valores mínimos de flutuações máximas

Para cada uma das declividades foi verificada a posição em que foram identificados os menores valores de flutuação máxima e posteriormente foi comparado com os resultados obtidos por Conterato (2014) para a mesma análise com declividade 1V:1H, indicando que a posição considerada mais adequada para as três declividades é a mesma, e corresponde a $1/2 H_v$. A Figura 63 e a Figura 64 apresentam, para cada posição relativa, os valores mínimos de máxima flutuação adimensionalizada, para as duas declividades de soleira analisadas. Nas figuras estão estacadas as posições:

- $L_s/(Y_2-Y_1) = 4$, posição aproximada de descolamento do ressalto;
- $L_s/(Y_2-Y_1) = 6$, posição aproximada do final do rolo do ressalto;
- $L_s/(Y_2-Y_1) = 8$, posição aproximada do final da influência do ressalto.

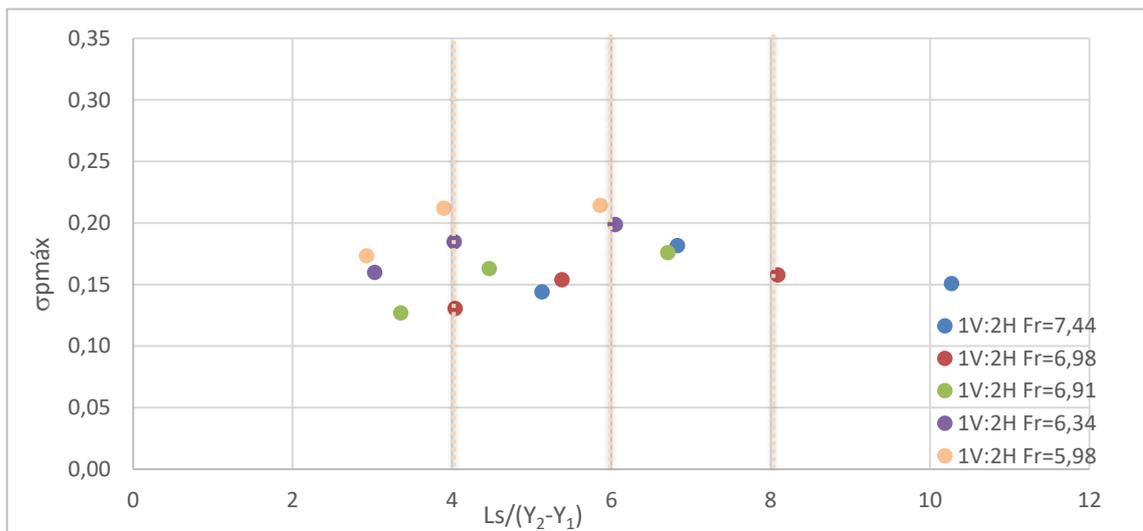


Figura 63: Valores de mínima flutuação máxima adimensionalizada em cada posição relativa de soleira, para declividade de soleira de 1V:2H.

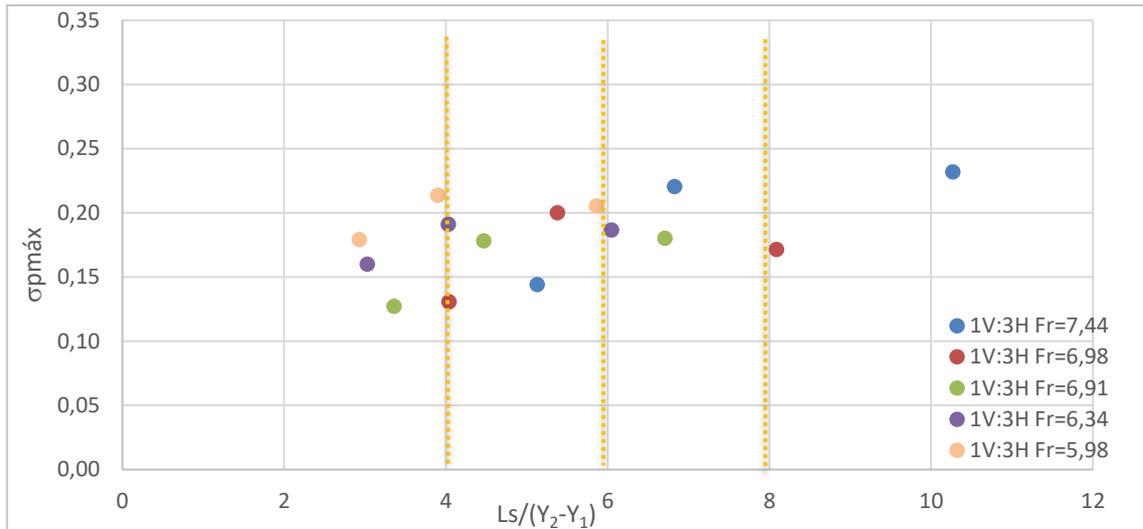


Figura 64: Valores de mínima flutuação máxima adimensionalizada em cada posição relativa de soleira, para declividade de soleira de 1V:3H.

Em cada situação das figuras anteriores, foram verificadas as alturas que resultaram nesses valores de mínima flutuação máxima. Na Figura 65 é apresentado esse resultado juntamente com os resultados obtidos por Conterato (2014) para a declividade 1V:1H.

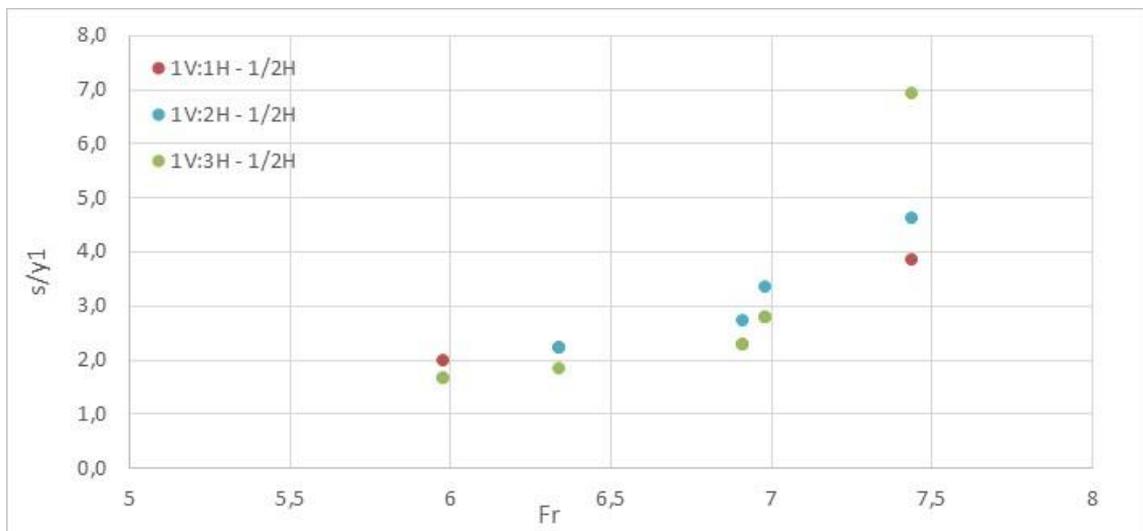


Figura 65: Valores de altura de soleira adimensionalizados que fornecem o menor $\sigma_{pmáx}$, em função do número de Froude, para as três declividades de soleira aqui estudadas.

Na Figura 65 é possível perceber que um ponto (declividade 1V:3H e $Fr=7,44$) se encontra fora da tendência geral. No entanto, esse ponto deve ser descartado pois se trata de uma soleira com altura de 18 cm com número de Froude de 7,44, situação em que a altura do escoamento sobre a soleira atinge a altura crítica. Pode-se, portanto, apresentar a tendência

que mostra a posição relativa ideal das soleiras para as declividades 1V:2H e 1V:3H em função do número de Froude, conforme Figura 66. Cabe ressaltar que a posição relativa 4 corresponde ao ponto de descolamento do ressalto, região que pode ser crítica para solos menos resistentes.

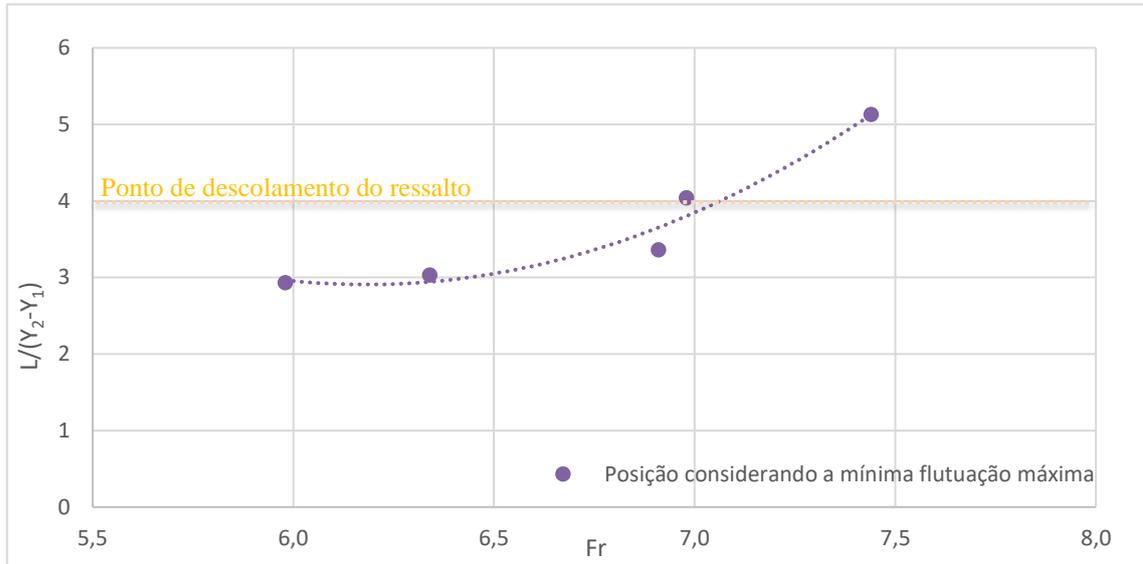


Figura 66: Posição relativa da soleira, para cada número de Froude, que apresentou os menores valores de flutuação máxima para as declividades estudadas.

Para fins de comparação, foram inseridos os resultados da Figura 63 e Figura 64 juntamente com os obtidos por Conterato (2014) para declividade de soleira 1H:1V, como se observa na Figura 67. Os dados do presente estudo se apresentam dispersos, diferente do que ocorre com a declividade de 1V:1H em Conterato (2014), onde se observava uma tendência dos valores diminuindo após a posição relativa 6. Os dados oscilam entre 0,12 e 0,23 nas duas situações. As posições relativas abaixo de 4 apresentam os maiores valores. No intervalo entre 4 e 6 os valores parecem se estabilizar, mas ainda mantêm uma certa dispersão, comportamento que segue para posições relativas superiores.

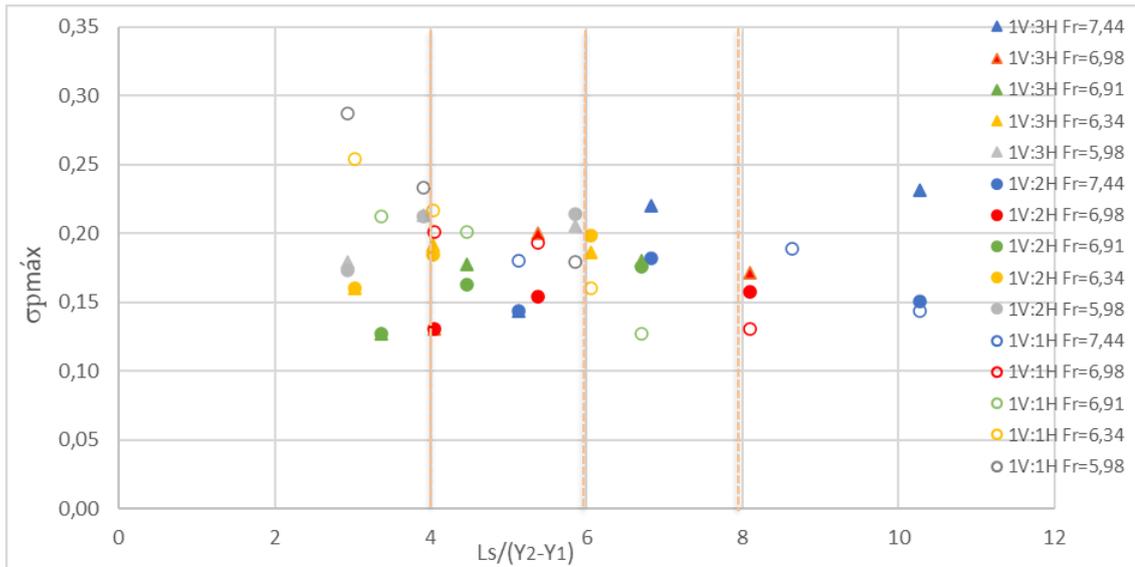


Figura 67: Menores valores de flutuação máxima adimensionalizada encontrados para cada posição em cada número de Froude para as três declividades estudadas.

Outra análise é aqui apresentada buscando uma relação entre a distância em que ocorre a mínima flutuação máxima e a posição relativa da soleira, para cada número de Froude. O gráfico da Figura 68 apresenta essa tendência.

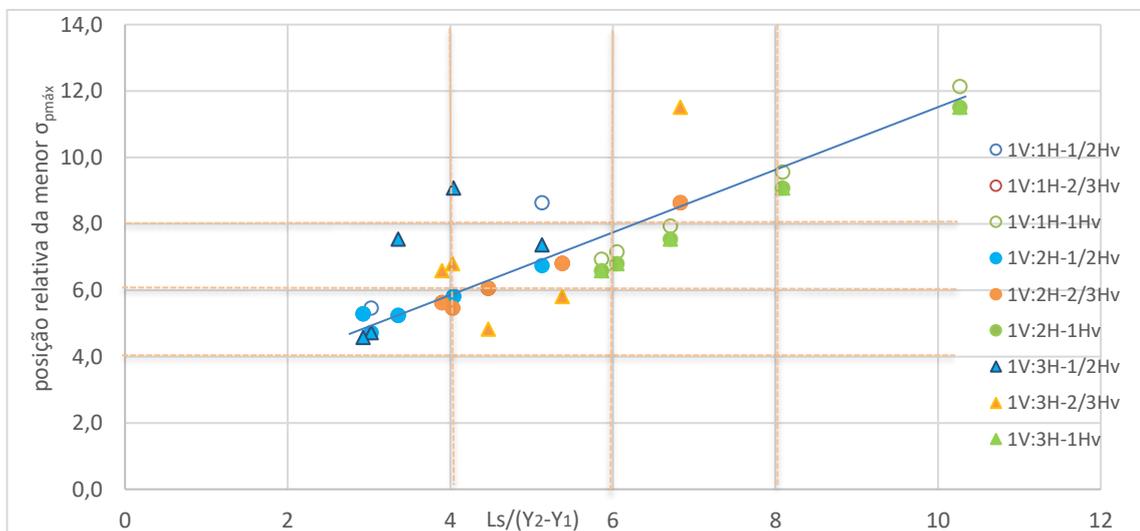


Figura 68: Posição relativa da soleira em relação à posição relativa de ocorrência da menor flutuação máxima.

Analisando o gráfico se pode perceber que os valores da posição relativa da menor flutuação máxima crescem com o aumento da posição relativa da soleira. Porém, até a posição relativa 6, são identificados dados mais dispersos da tendência geral para a declividade 1V:3H nas posições 1/2 H_v e 2/3 H_v. A posição 1/1 H_v apresenta uma tendência bem definida para as três declividades (destacada na cor verde no gráfico).

b) Análise considerando os valores máximos de flutuações máximas

Uma outra análise utilizando a máxima flutuação adimensionalizada ($\sigma_{pm\acute{a}x}$) foi realizada para entender a relação entre os pontos de ocorrência dos pontos máximos das máximas flutuações (diferente da análise anterior que considerou os mínimos desses pontos críticos) para cada declividade. As figuras a seguir apresentam essa análise para cada declividade de soleira sendo que L é medido a partir do início da bacia de dissipação.

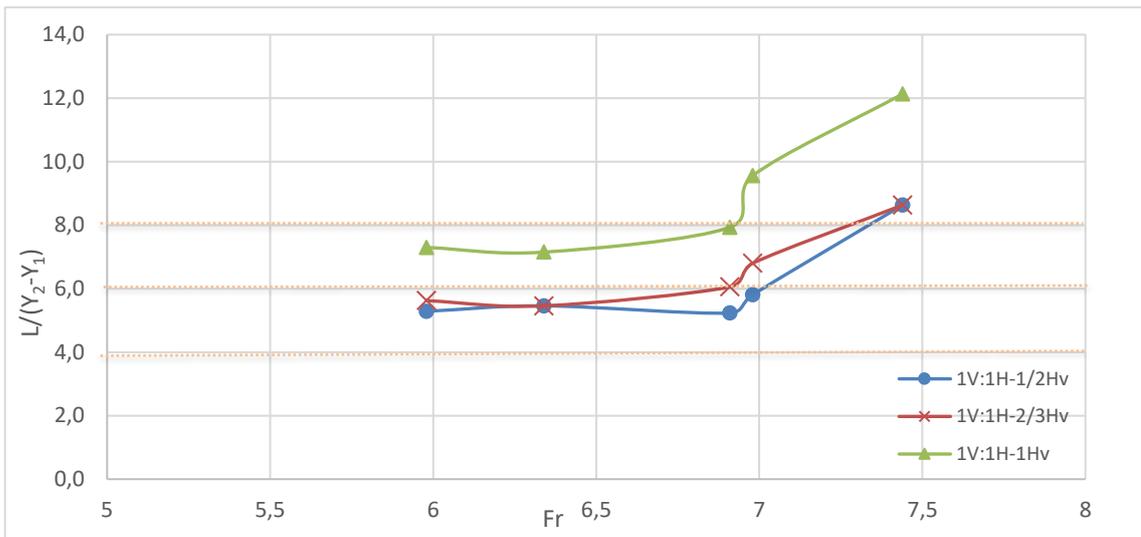


Figura 69: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com declividade 1V:1H.

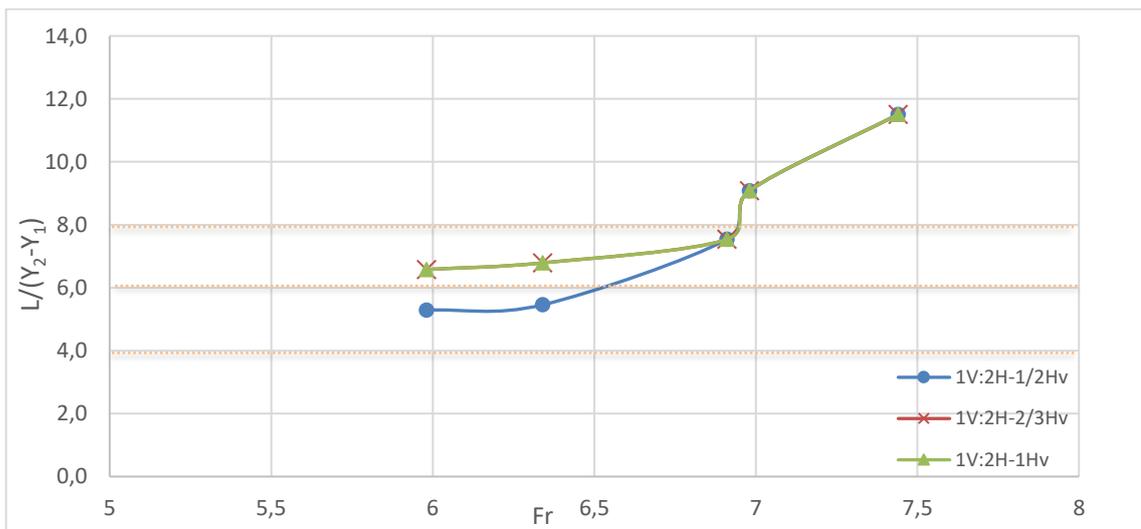


Figura 70: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com declividade 1V:2H. Os resultados da posição 2/3 e 1/1 H_v são coincidentes.

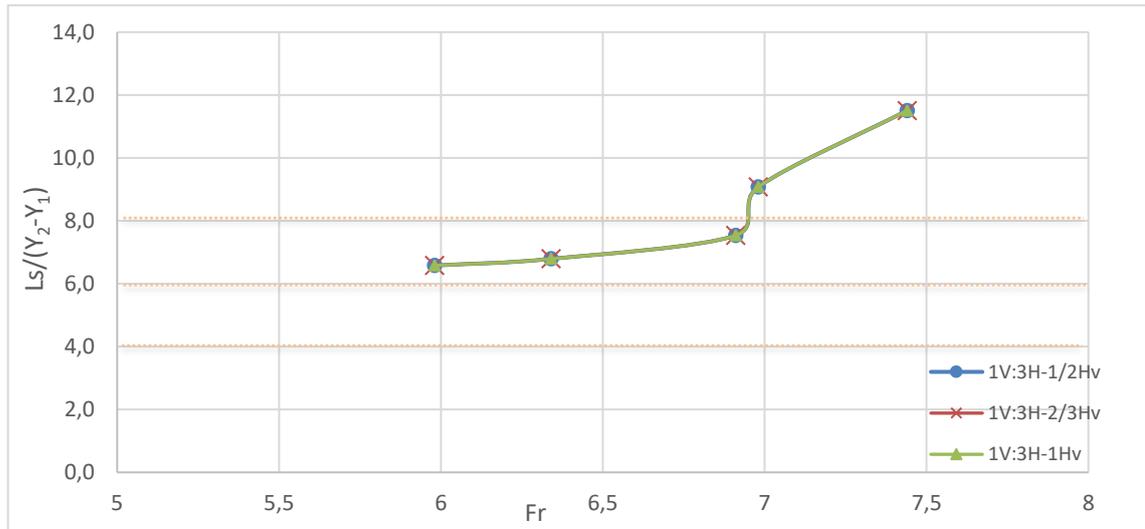


Figura 71: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com declividade 1V:3H. Os valores são coincidentes para as três posições.

Na Figura 69 percebe-se que para declividade 1V:1H os pontos máximos ocorrem em posições relativas diferentes para cada número de Froude, mas as posições 1/2 H_v e 2/3 H_v apresentam valores coincidentes ou muito próximos. A posição 1/1 H_v apresenta os valores críticos em posições mais próximas ao final do ressalto sendo que para os dois maiores números de Froude esse ponto crítico ocorre além da posição relativa 8.

Na Figura 70 a maioria dos valores coincidem para cada número de Froude, com exceção dos dois primeiros (5,98 e 6,34) para a posição 1/2 H_v, ficando abaixo da posição relativa 6. Para os dois últimos números de Froude esses pontos ocorrem além da posição relativa 8.

Já para a declividade 1V:3H, mostrada na Figura 71, se observa que os pontos de máximo coincidem, ou seja, não importa a posição da soleira, o ponto de máxima flutuação ocorre na mesma posição. Da mesma forma que para situação anterior, para os dois últimos números de Froude esses pontos ocorrem além da posição relativa 8.

A Figura 72 mostra os resultados para todos os casos estudados. É possível perceber que para todos os casos as posições críticas para os três primeiros números de Froude ficaram entre a posição relativa 5 e 8. Para todos os casos o último número de Froude ocorreu acima da posição relativa 8 enquanto os demais ficam entre a posição relativa 4 e 6.

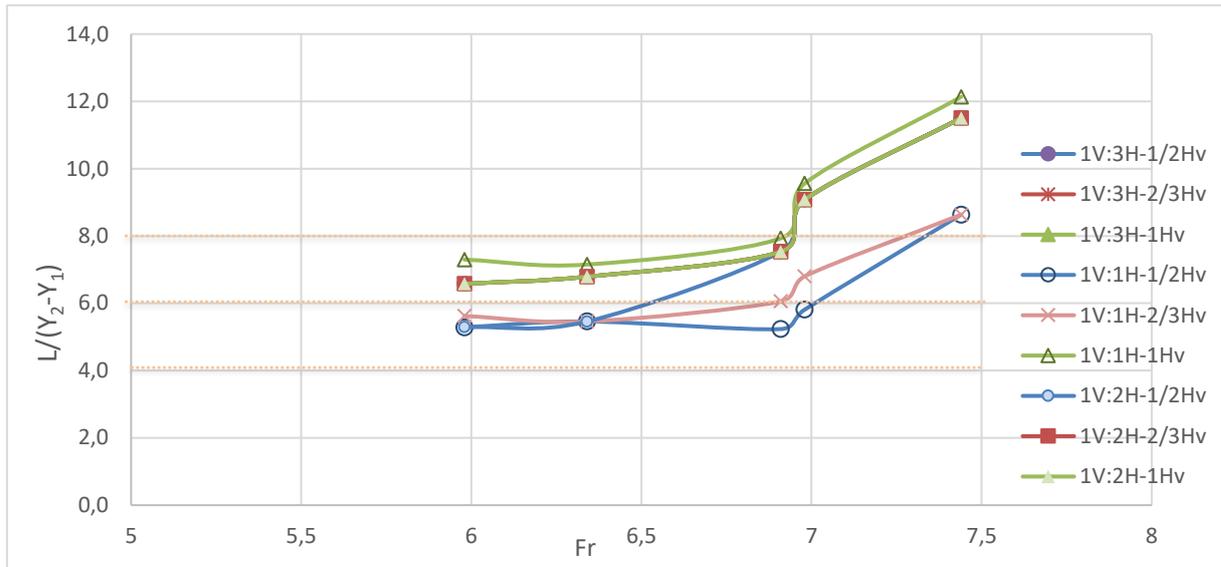


Figura 72: Posição relativa de ocorrência da máxima flutuação para cada número de Froude para soleiras com todas as declividades.

Na figura é importante salientar que as declividades que apresentaram pontos críticos a uma maior distância em relação ao início da bacia são 1V:2H e 1V:3H. Apenas a posição 1/1 H_v na declividade 1V:1H apresentou comportamento semelhante, o que seria esperado considerando que pelo tamanho da bacia a maior parte da energia é dissipada dentro dela. Marques (1995) concluiu em seu estudo que o ângulo de 20° seria o mais adequado para saída de dissipadores. A declividade 1V:3H corresponde a 18,4°, e a declividade 1V:2H corresponde a 26,6°. Entre os 3 ângulos estudados estes são os mais próximos ao indicado por Marques (1995) e se observa que foram os que apresentaram o melhor resultado em relação à distância de ocorrência dos pontos mais críticos de flutuação máxima.

As análises mostradas consideraram apenas os valores de flutuação máxima, sem a preocupação da distância em que ocorrem em relação ao final da estrutura. Contudo, essa distância deve ser considerada também, já que flutuações mais próximas ao pé da soleira, mesmo que em uma menor magnitude, podem oferecer um risco maior que outra de maior intensidade ocorrendo distante da estrutura. A seguir são demonstrados os resultados considerando também a distância de ocorrência, conforme apresentado na metodologia.

4.3.2 Resultados da análise considerando a distância de ocorrência da flutuação máxima (análise do gradiente)

A Figura 73 apresenta os valores obtidos para o gradiente Ω em função da altura da soleira e da posição relativa da soleira, para a vazão de 80 l/s ($Fr = 6,91$) para soleiras com declividade

1H:2V. A Figura 74 apresenta os mesmos resultados para a declividade 1H:3V. Os resultados obtidos para as demais vazões encontram-se no Anexo IV. Nas figuras, a situação de bacia sem soleira foi incluída, sendo, nesse caso, o gradiente calculado considerando o fim da bacia nos três pontos estudados. Essa situação foi incluída apenas para fins de comparação, auxiliando no entendimento do comportamento dos valores de gradiente.

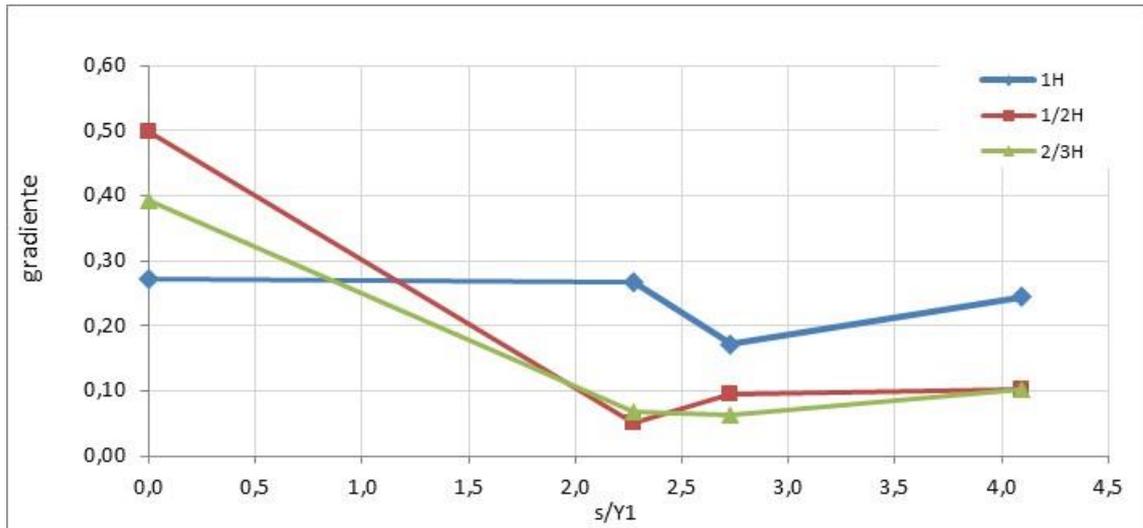


Figura 73: Resultados do gradiente Ω em função da altura relativa da soleira para diferentes posições, para a vazão de 80 l/s ($Fr = 6,91$), com soleira na declividade 1H:2V.

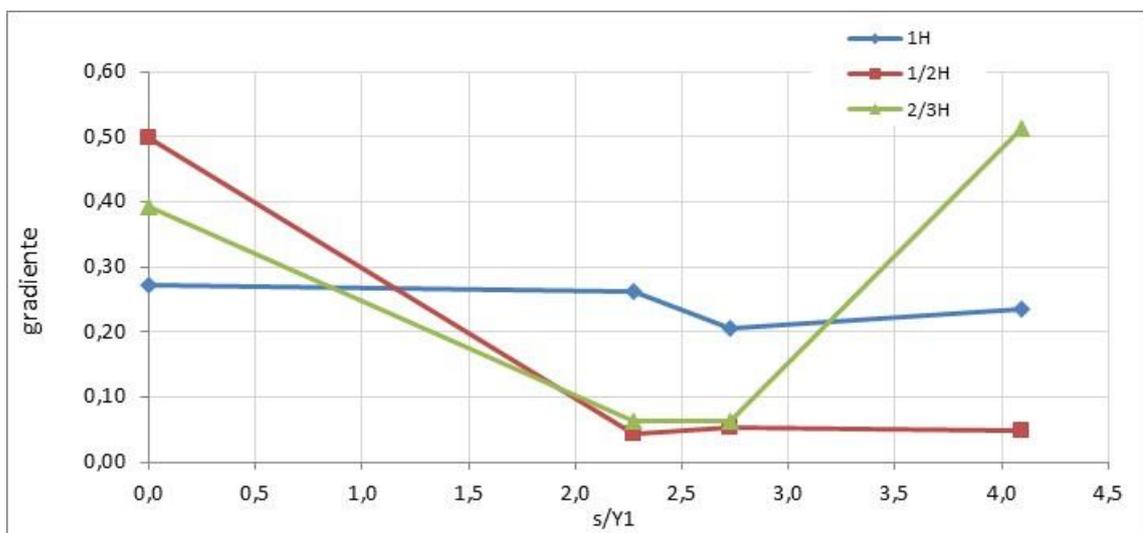


Figura 74: Resultados do gradiente Ω em função da altura relativa da soleira para diferentes posições, para a vazão de 80 l/s ($Fr = 6,91$), com soleira na declividade 1H:3V.

Nas figuras apresentadas acima é possível verificar que os menores valores de gradiente ocorrem para a posição 1/2 Hv e altura 10 cm. Para cada condição foi identificado esse ponto de menor gradiente e os resultados estão tabelados nas tabelas seguintes.

Tabela 9: Resultados de menores valores de gradiente encontrados para soleiras com declividade 1V:2H

	posição	s/y1	gradiente	s
Fr=7.44	Posição 1/2Hv	3,85	0,042	s = 10
	Posição 2/3Hv	4,62	0,047	s = 12
	Posição 1Hv	4,62	0,175	s = 12
Fr=6.98	Posição 1/2Hv	2,78	0,047	s = 10
	Posição 2/3Hv	3,33	0,054	s = 12
	Posição 1Hv	3,33	0,149	s = 12
Fr=6.91	Posição 1/2Hv	2,27	0,051	s = 10
	Posição 2/3Hv	2,73	0,062	s = 12
	Posição 1Hv	2,73	0,172	s = 12
Fr=6.34	Posição 1/2Hv	1,85	0,055	s = 10
	Posição 2/3Hv	2,22	0,073	s = 12
	Posição 1Hv	0,00	0,214	s = 0
Fr=5.98	Posição 1/2Hv	1,67	0,059	s = 10
	Posição 2/3Hv	2,00	0,082	s = 12
	Posição 1Hv	0,00	0,163	s = 0

Tabela 10: Resultados de menores valores de gradiente encontrados para soleiras com declividade 1V:3H

	posição	s/y1	gradiente	s
Fr=7.44	Posição 1/2Hv	4,62	0,046	s = 12
	Posição 2/3Hv	4,62	0,047	s = 12
	Posição 1Hv	4,62	0,138	s = 12
Fr=6.98	Posição 1/2Hv	2,78	0,034	s = 10
	Posição 2/3Hv	3,33	0,055	s = 12
	Posição 1Hv	3,33	0,176	s = 12
Fr=6.91	Posição 1/2Hv	2,27	0,043	s = 10
	Posição 2/3Hv	2,27	0,062	s = 10
	Posição 1Hv	2,73	0,206	s = 12
Fr=6.34	Posição 1/2Hv	3,33	0,056	s = 18
	Posição 2/3Hv	3,33	0,069	s = 18
	Posição 1Hv	0,00	0,214	s = 0
Fr=5.98	Posição 1/2Hv	2,00	0,063	s = 12
	Posição 2/3Hv	3,00	0,080	s = 18
	Posição 1Hv	0,00	0,163	s = 0

A Figura 75 e a Figura 76 apresentam os resultados para cada posição para declividade 1V:2H e 1V:3H respectivamente. Nessas figuras é possível verificar que a posição $1/2 H_v$ apresenta os menores valores de gradiente. A posição $2/3 H_v$ apresenta valores levemente superiores e a posição $1/1 H_v$ apresenta os maiores valores. É também possível observar que os valores de gradiente diminuem conforme aumenta o número de Froude.

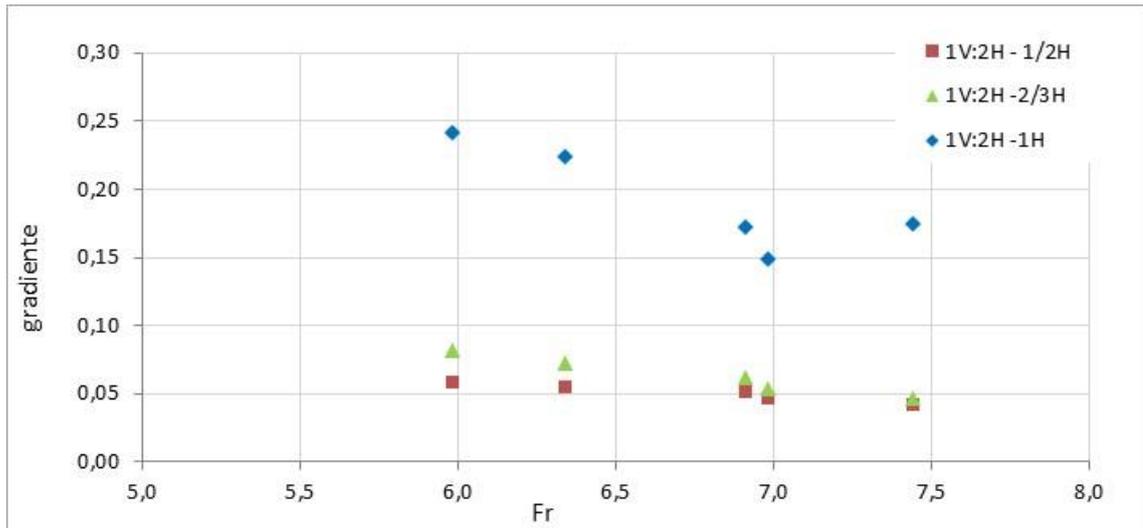


Figura 75: Resultados do gradiente Ω para cada posição para declividades diferentes de soleira.

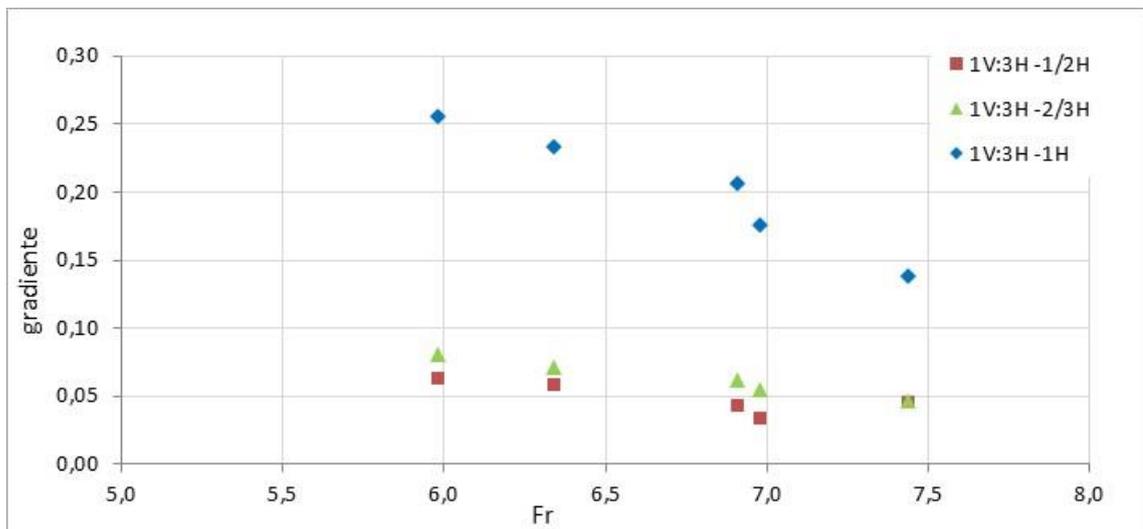


Figura 76: Resultados do gradiente Ω para cada posição para declividades diferentes de soleira.

A Figura 77 apresenta os menores valores de gradiente para as três declividades (incluindo a declividade 1V:1H estudada em Conterato 2014). A linha de tendência foi adicionada em cada caso para auxiliar a visualização do comportamento dos dados. Para cada declividade, a

posição que apresentou os menores resultados foi a $1/2 H_v$. No geral os menores valores encontrados foram para as declividades 1V:2H e 1V:3H, estando os valores bem próximos. Essas duas declividades correspondem a $18,4^\circ$ e $26,6^\circ$, respectivamente.

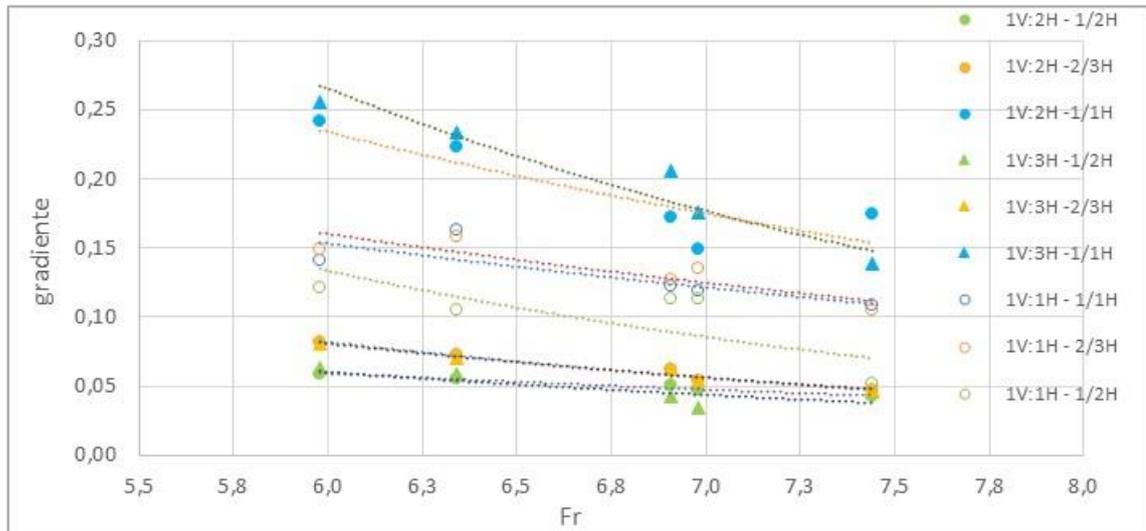


Figura 77: Resultados do gradiente Ω para cada posição para declividades diferentes de soleira.

Para todas as declividades a posição $1/2 H_v$ foi a que apresentou os menores valores de gradiente e se observa que os valores obtidos para a declividade $1/1 H_v$ se encontram na faixa central. Na Figura 78 é apresentada uma curva ajustada para a melhor posição obtida para cada número de Froude pela análise do gradiente. Essa curva é resultado da análise das três declividades de soleira terminal aqui consideradas.

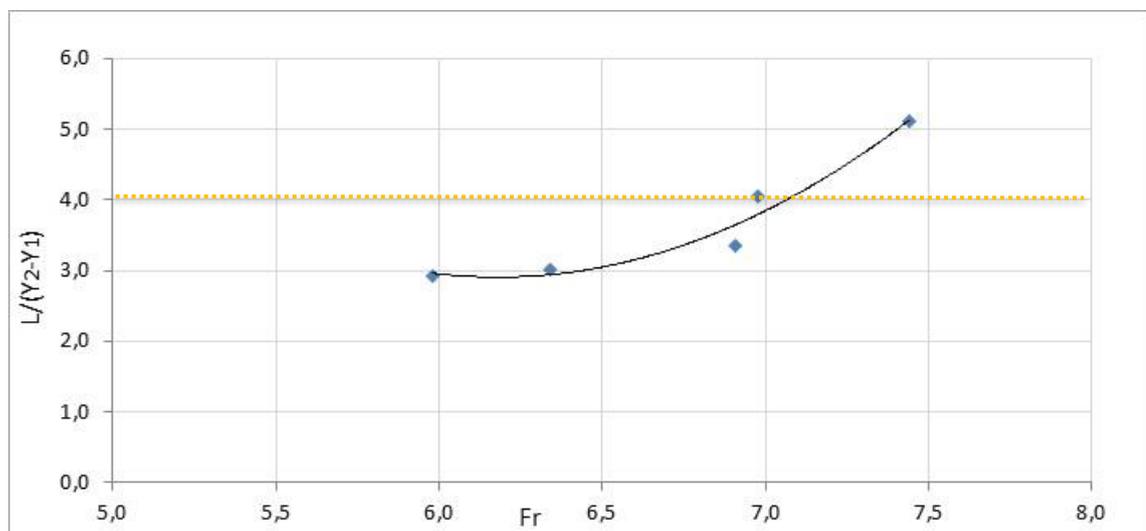


Figura 78: Posição adimensionalizada da soleira que apresentou os melhores resultados pela análise do gradiente para as três declividades de soleira utilizadas.

Em cada situação que apresentou o menor gradiente, foram buscadas as respectivas alturas de soleira. Assim foi elaborado o gráfico da Figura 79 limitando, para cada número de Froude, a altura mínima a ser considerada.

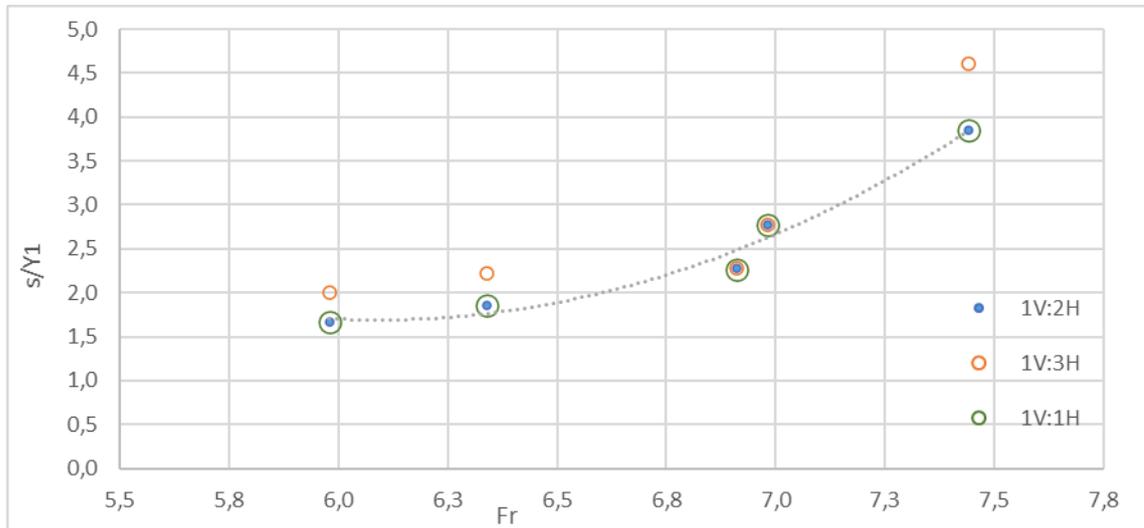


Figura 79: Altura adimensionalizada da soleira para cada número de Froude, para as três declividades estudadas.

Os resultados pela análise do gradiente retornam valores muito semelhantes aos obtidos por Conterato (2014) para a declividade 1V:1H, inclusive a declividade 1V:2H resultou nos mesmos valores para cada número de Froude. Os valores encontrados para a declividade 1V:3H estão levemente acima para três das cinco vazões estudadas.

4.4 INDICAÇÃO DOS LIMITES PARA DIMENSIONAMENTO

Considerando os resultados apresentados, foram elaborados gráficos para determinação do melhor posicionamento e da melhor altura da soleira terminal considerando o estudo com três diferentes alturas, três declividades, e três posições na bacia de dissipação.

4.4.1 Altura de soleira

Considerando a análise realizada a montante e a jusante da soleira, obteve-se a Figura 80 para determinação da melhor altura de soleira na faixa de números de Froude analisada. O limite superior é limitado pela chamada altura crítica limite da soleira para evitar que o escoamento atinja altura crítica sobre a mesma. O limite inferior é limitado considerando a mínima flutuação máxima e a distância em que a mesma ocorre em relação ao final da bacia de

dissipação. Os valores encontrados analisando as declividades 1V:2H e 1V:3H estão dentro do limite estabelecido em Conterato (2014) para a declividade 1V:1H.

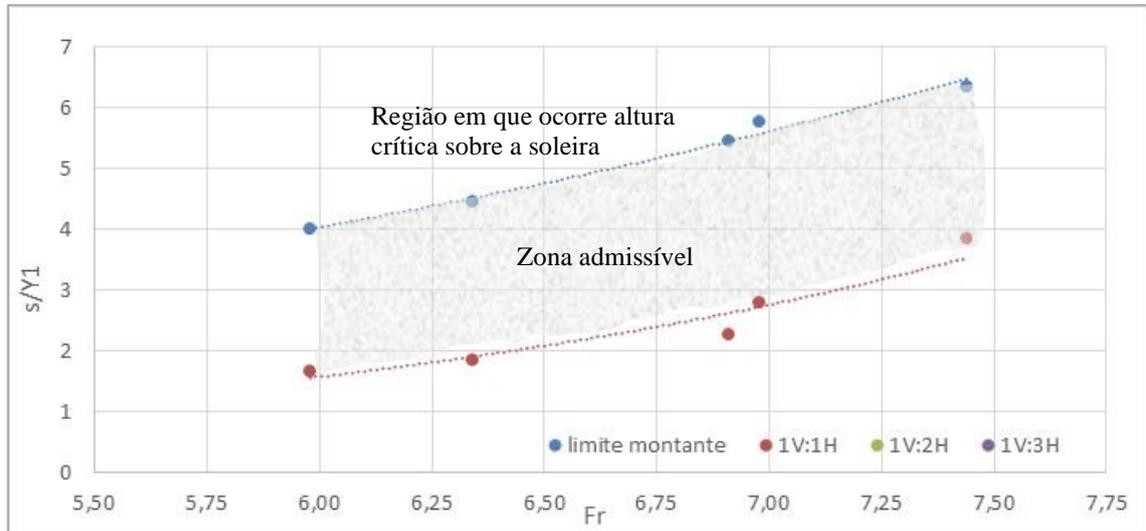


Figura 80: Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude para soleiras com declividades 1V:1H, 1V:2H, 1V:3H.

Respeitar o limite superior é importante para evitar a ocorrência de altura crítica sobre a soleira, situação que poderia oferecer risco ao funcionamento da estrutura. O limite inferior deve ser respeitado para que o efeito dessa soleira seja eficiente na bacia de dissipação pois, soleiras menores, podem não oferecer um resultado perceptível em relação à uma bacia livre.

4.4.2 Posicionamento da soleira

Considerando a análise realizada para as duas declividades a melhor posição da soleira resultou exatamente nos mesmos valores encontrados em Conterato (2014) para a declividade 1V:1H. Da mesma forma aqui se considera coerente utilizar os seguintes limites, baseado também em bibliografias:

- para geologias facilmente erodíveis, sugere-se que o comprimento da bacia deve ser $L_s \geq 6,9 (Y_2 - Y_1)$, conforme indicado por Elevatorski (1959);
- para geologias não facilmente erodíveis, sugere-se que o comprimento da bacia deve se situar entre $4,0 (Y_2 - Y_1) < L_s < 6,0 (Y_2 - Y_1)$, devendo ser fixado em função das características da geologia.

Na Figura 81 é apresentado o resultado da região indicada para o posicionamento de soleira terminal conforme o tipo de solo. A área hachurada representa a faixa admissível para posicionamento da soleira terminal para cada número de Froude.

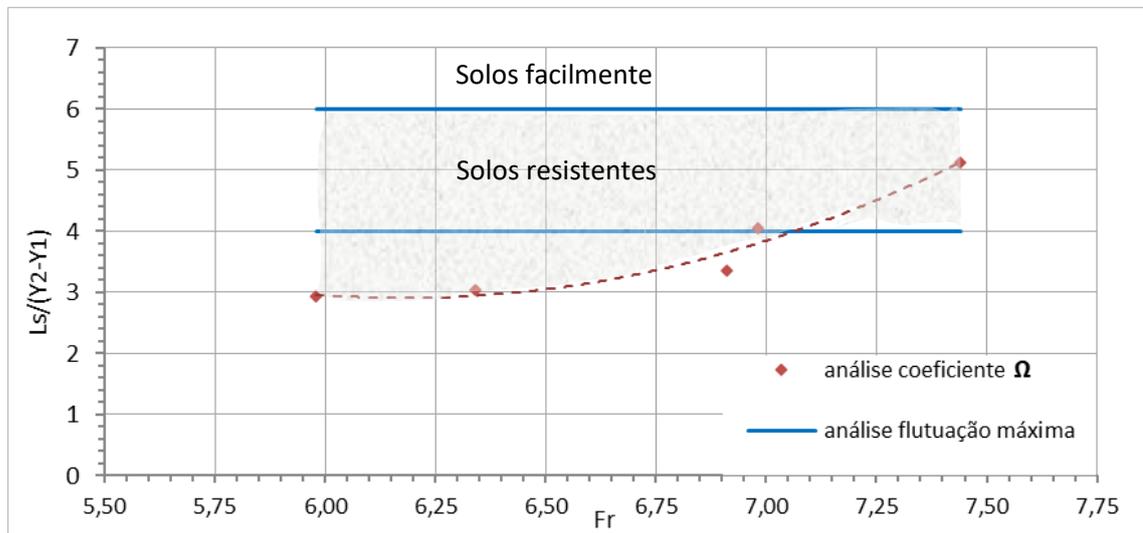


Figura 81: Faixa indicada para posicionamento da soleira considerando três diferentes declividades para cada número de Froude.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo propor uma metodologia de dimensionamento para soleiras terminais de diferentes declividades em bacias de dissipação. Foram coletados dados de pressões instantâneas no fundo de bacia de dissipação com soleiras variando declividade, altura e posição dentro da bacia. A metodologia de análise aplicada foi a mesma utilizada por Conterato (2014) em estudo abordando apenas uma declividade de soleira.

Todos os resultados foram comparados com bacia sem acessórios, tipo I. Cabe ressaltar que foi mantido constante o nível de jusante para uma mesma vazão, equivalente ao que seria obtido com ressalto livre. Esse critério foi o mesmo utilizado por Peterka (1984). Entre as conclusões se pode destacar:

a) A montante da soleira:

- a inserção de soleiras causa um afogamento artificial na bacia. Quanto maior o ângulo da soleira maior esse afogamento;
- as pressões médias são maiores em bacias com soleiras comparando com bacias tipo I, tendendo a aumentar conforme aumenta o seu ângulo, acompanhando a linha d'água;
- as flutuações de pressões tendem a reduzir conforme aumenta a altura da soleira, mas é preciso respeitar o limite proposto em Conterato (2014) de altura máxima de soleira para evitar que a altura sobre a soleira atinja a altura crítica do escoamento.

b) A jusante da soleira:

- quanto maior o ângulo da soleira, maior a altura que o jato lançado por ela atinge;
- as pressões médias tendem a diminuir com o ângulo da soleira, e tendem a ser inferiores à valores encontrados em bacia tipo I;
- para todas as declividades, a bacia com soleira posicionada a $1/2 H_v$ apresentou os menores resultados em relação à flutuação máxima, inclusive considerando a distância em que esse ponto ocorre em relação ao pé da soleira (gradiente);
- a declividade que resultou nos menores valores de flutuação máxima foi a 1V:3H, que equivale a um ângulo de $18,4^\circ$. A declividade 1V:2H, que equivale a um ângulo de $26,6^\circ$,

apresentou valores intermediários e a situação com declividade 1V:1H, que equivale a 45° apresentou os maiores valores de flutuação máxima na maioria das situações. A utilização de Ângulo 18,4° (1V:3H) vai ao encontro da sugestão de Marques (1995) que recomenda ângulos de lançamento da ordem de 20° (1V:2,75H);

c) Em relação à posição e altura da soleira:

Foi possível concluir que o ângulo da soleira não influenciou os resultados obtidos em Conterato (2014) para posição e altura se soleira. Portanto, para posicionamento da soleira, deve-se respeitar os limites indicados dependendo o tipo de solo, conforme apresentado na Figura 81.

- para geologias facilmente erodíveis, sugere-se que o comprimento da bacia deve ser $L_s \geq 6,9 (Y_2 - Y_1)$;
- para geologias não facilmente erodíveis, sugere-se que o comprimento da bacia deve se situar entre $4,0 (Y_2 - Y_1) < L_s < 6,0 (Y_2 - Y_1)$, devendo ser fixado em função das características da geologia.

A altura da soleira deve respeitar os limites estabelecidos na Figura 80. Para todas as declividades a análise resultou em valores semelhantes para altura ideal

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para trabalhos futuros:

- aplicar a mesma análise para bacias a jusante de vertedouros em degraus que atendam uma faixa maior de números de Froude, uma vez que o modelo utilizado limitava a faixa de 5,98 a 7,44;
- testar mais opções de ângulos, em torno dos que apresentaram os melhores resultados no presente estudo. Sugere-se: 1V: 2,5H, 1V: 2,75H, e 1V: 3,5H;
- aplicar a mesma metodologia de análise para as pressões extremas máximas ($P_{99,9\%}$) e mínimas ($P_{0,1\%}$) e as suas amplitudes ($P_{99,9\%} - P_{0,1\%}$) na região a jusante da soleira, na região de impacto do jato lançado pela soleira;
- analisar outras posições de soleira dentro do ressalto variando entre $4(Y_2 - Y_1)$ e $8(Y_2 - Y_1)$;
- analisar bacias de dissipação incluindo blocos dispersores em seu interior, além da soleira terminal, a fim de comparar o comportamento entre essas duas situações.

REFERÊNCIAS

- AMADOR, A. **Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos Escalonados em Presas de Hormogón Compactado**, 2005. Tese (Doctorado en Ingeniería) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- ALIKHANI, A.; BEHROZI-RAD, R.; FATHI-MOGHADAM, M. Hydraulic jump in stiling basin with vertical end sill. **International Journal Physical Sciences**. v. 5, p.25-29, January, 2010.
- BUNG, D. B.; SUN, Q.; MEIRELES, I.; VISEU, T.; MATOS, J.. USBR type III stilling basin performance for steep stepped spillways. 4th IAHR INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON HYDRAULIC STRUCTURES. 2012. Porto, Portugal.
- CARDOSO, F. G. **Estudo do ressalto hidráulico em bacias de dissipação de energia a jusante de descarregadores de cheias em degraus**. 2006. 143 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- CONTERATO, E. **Escoamento sobre vertedouro em degraus com declividade 1v:0,75h: caracterização das pressões e condições de aeração**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- CONTERATO, E. **Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus**. Dissertação de mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1 jan. 2014.
- CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ENDRES, L. A. M.; NOVAKOSKY, C. K. “Soleiras terminais em bacias de dissipação a jusante de vertedouros em degraus: efeito na distribuição longitudinal das pressões médias junto ao fundo.” XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves. ABRH, 2013.
- DAI PRÁ, M. **Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H**. 2004. 134 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DAI PRÁ, M. **Uma Abordagem para Determinação das Pressões Junto ao Fundo de Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico**. 2011. 208 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- DONNELLY, C. A.; BLASDELL, F. W. Straight Drop Spillway Stilling Basin. Technical paper nº 15, Series B. University of Minnesota, 1954.
- ELEVATORSKI, A. E. **Hydraulic Energy Dissipators**, 1959. McGraw-Hill: New York.
- ENDRES, L.A. M. **Contribuição ao desenvolvimento de um sistema para aquisição e tratamento de dados de pressões instantâneas em laboratório**. 1990. 104f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em

Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FECAROTTA, O. et al. **Experimental results on the physical model of an USBR type II stilling basin**. London: CRC Press, 24 jun. 2016. Disponível em: <<http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9781315644479-42>>. Acesso em: 12 abr. 2018

GOMES, J. **Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H**. 2006. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HAGER, W. H. Energy dissipators and hydraulic jump. **Water Science and Technology Library**. Kluwer Academic Publishers, 1992.

HUNT, S. L.; KADAVY, K. C. Types I, II, III, and IV Stilling Basin Performance for Stepped Chutes Applied to Embankment Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 147, n. 6, p. 06021004, jun. 2021.

LOPARDO, R. A. & HENNING, R. E. “Efectos de lãs condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantâneas”. XII CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 1986. São Paulo, Brasil.

MARQUES, M. G. **Nouvelle approche pour le dimensionnement des dissipateurs à auge**, 1995. Thèse) – Département de Génie civil, Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec.

MARQUES, M. G., DRAPEAU, J., VERRETTE, J. L. “Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. V. 2, n.2, p. 45-52, 1997.

MATOS, J. S. G. **Emulsão de Ar e Dissipação de Energia do Escoamento em Descarregadores em Degraus**, 1999. Tese (Doutorado em Engenharia) – Instituto Superior Técnico, Lisboa.

MEES, A. A. A. **Caracterização das solicitações hidrodinâmicas em bacias de dissipação por ressalto hidráulico com baixo número de Froude**. 2008. 157 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MEIRELES, I.O.C. **Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus**. 2004. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

MEIRELES, I.; MATOS, J.; FALCÃO DE MELO, J.. Pressure head and residual energy in skimming flow on steeply sloping stepped spillways. **XXXI International Association of Hydraulic Engineering and Research Congress**, Seul (Coreia do Sul), 11 a 16 de setembro, 2005.

Meireles, I., Matos, J. and Silva-Afonso, A. (2010). “Flow characteristics along a USBR type III stilling basin downstream of steep stepped spillways.” Proc. 3rd Int. Junior Researcher and

Engineer Workshop on Hydraulic Structures, Edinburgh, Scotland, Hydraulic Model Report CH80/10, The University of Queensland, Brisbane, Australia, pp. 57-64

MEIRELES, I. O. C. **Hidráulica dos descarregadores em degraus: estudo experimental-numérico-teórico**. 2011. 293f. Tese (Doutorado em Engenharia). Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro. Portugal.

MEIRELES, I. et al. Skimming, Non-aerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 10, p. 870–877, out. 2012.

NOVAKOSKI, C. K. **Análise da distribuição longitudinal das pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro em degraus**. Dissertação de mestrado—Porto Alegre: UFRGS, 2016.

NOVAKOSKI, C. K. et al. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. **RBRH**, v. 22, n. 0, 2017.

NÓBREGA, J. D. **Metodologia teórica e experimental para determinação das características do ressalto hidráulico clássico**. Dissertação de mestrado—São Paulo: Universidade de São Paulo, 2014.

OLIVEIRA, N. C. C. DE. A grande aceleração e a construção de barragens hidrelétricas no Brasil. **Varia Historia**, v. 34, n. 65, p. 315–346, ago. 2018.

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

PADULANO, R. et al. Hydraulic Design of a USBR Type II Stilling Basin. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, p. 04017001, maio 2017.

PETERKA, A. J. Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators. 1984. Washington, U. S. Govt. Print. Off.

PINHEIRO, A. A. N. **Ações hidrodinâmicas em soleiras de bacia de dissipação de energia por ressalto hidráulico**. 1995. 353 f. - Tese (Doutorado em Engenharia) Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

PINHEIRO, A. A. N. Estruturas hidráulicas - obras de dissipação de energia. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura. Instituto Superior Técnico, 2006, Lisboa, Portugal.

PIRESTANI, M. R.; RAZMKHAH, A.; GHOBADI, F. Effect of convergent walls on energy dissipation in stilling basin by physical modeling. **International Journal of Thermal and Fluid Sciences**. v. 1, p. 1-10, 2012.

POVH, P. H. **avaliação da energia residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxo em skimming flow**. 2000. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Departamento de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

RAJARATNAM, N. Hydraulic jump. **Advances in Hydroscience**. v. 4, por Chow, V. T. (ED), 1967. Academic Press: New York.

SANAGIOTTO, D. **características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

SIMÕES, A. L. A.; PORTO, R. DE M. Pré-Dimensionamento De Bacias De Dissipação a Jusante De Vertedouros Em Degraus Com Forte Declividade. **Revista Minerva**, v. 5, n. 1, p. 17 a 24, 2008.

SIMÕES, A.; SCHULZ, E. H.; PORTO, R. M. Definições para o comprimento do ressalto hidráulico e bacias de dissipação a jusante de vertedouros. XXV CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 2012. San José, Costa Rica.

TAJABADI, F.; JABBARI, E.; SARKARDEH, H. Effect of the end sill angle on the hydrodynamic parameters of a stilling basin. **The European Physical Journal Plus**, v. 133, n. 1, p. 10, jan. 2018.

TEIXEIRA, E.D. **Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2008. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

TIWARI, H. L.; GOEL, A.; GAHLOT, V. K. Experimental study of effect of end sill on stilling basin performance. **International Journal Engineering Science and Technology**. v. 3, n. 4, p. 3135-3140, abril, 2011.

TIWARI, H.; GOEL, A. Effect of End Sill in the Performance of Stilling Basin Models. **American Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 2, p. 60–63, 2014.

TOZZI, M. J. **Caracterização/Comportamento de Escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus**. 1992. 302 f. Tese (Doutorado em Hidráulica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.

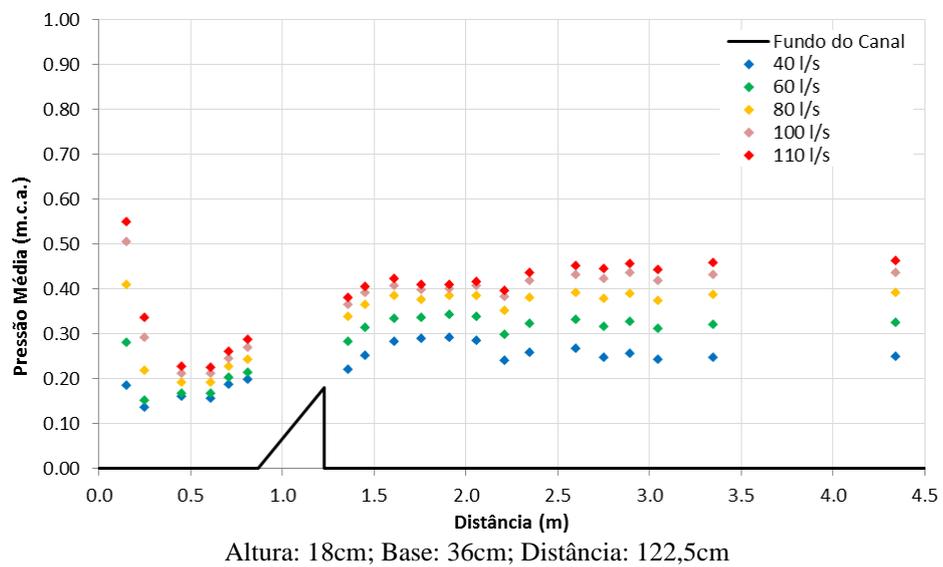
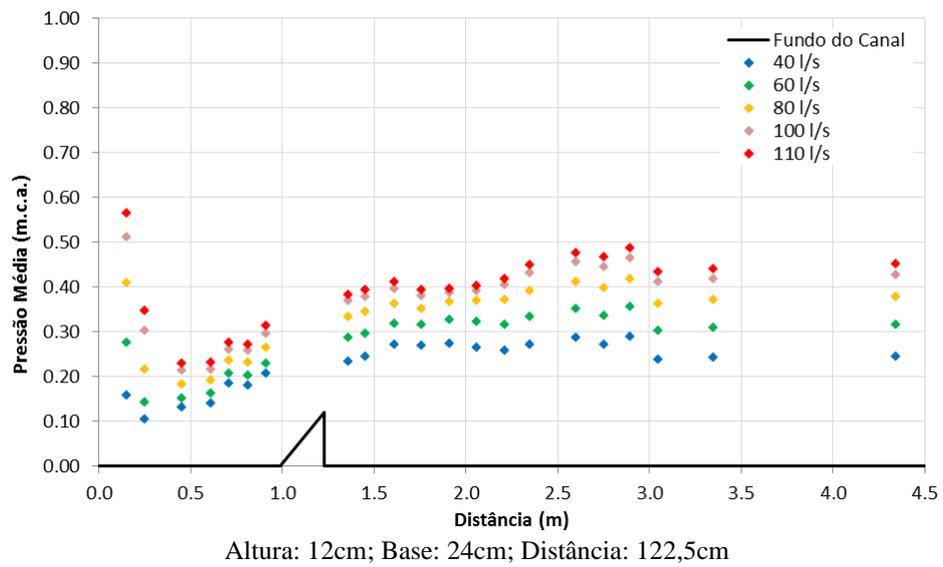
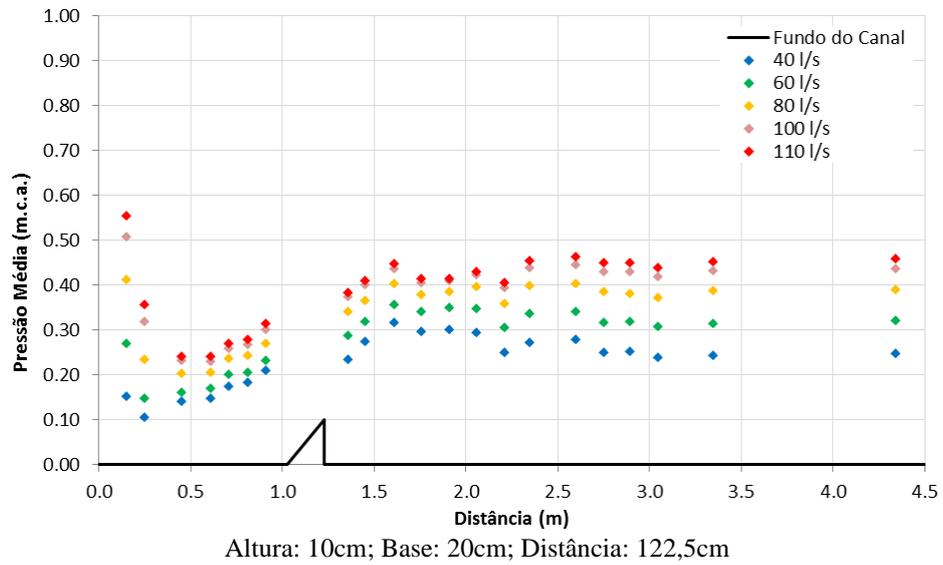
U.S. BUREAU OF RECLAMATION. **Design of Small Dams**, Water Resources Technical Publication. 1987. 860p.

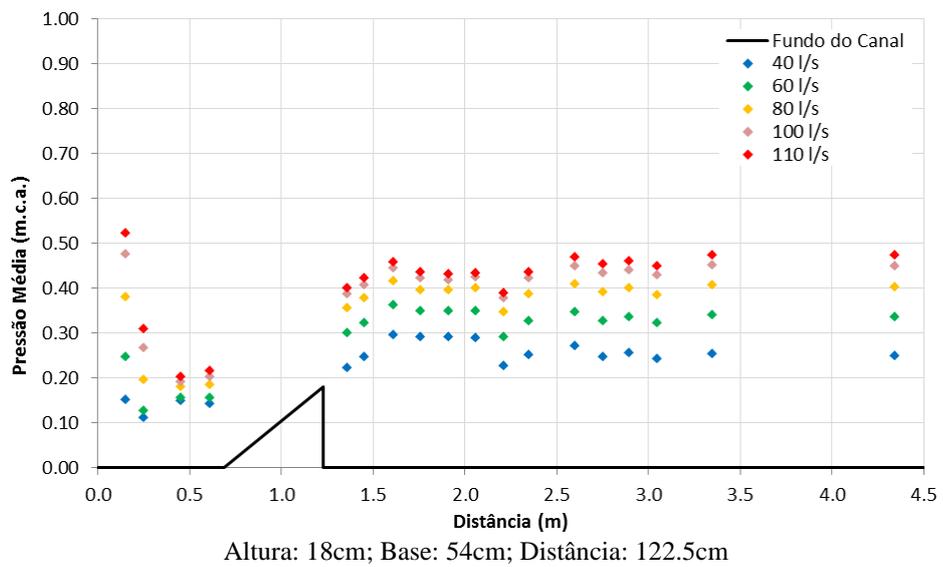
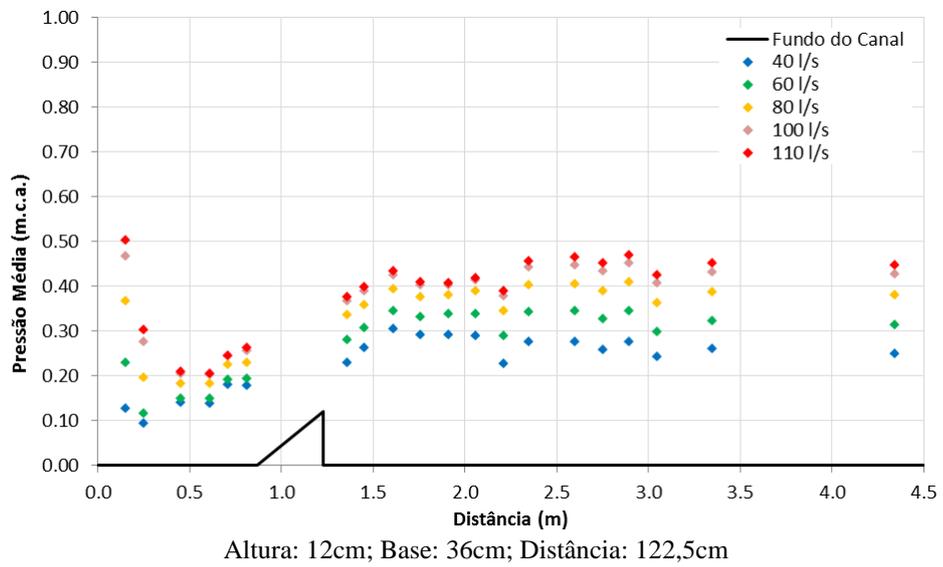
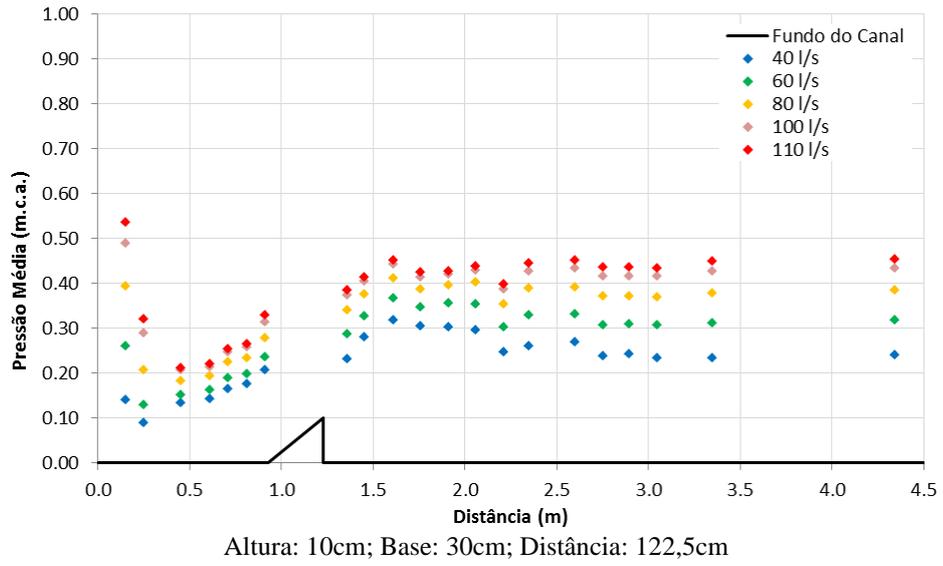
VISCHER, D. L.; HAGER, W.H. **Energy Dissipators**. IAHR, Hydraulic Structures Desing Manual.1995.

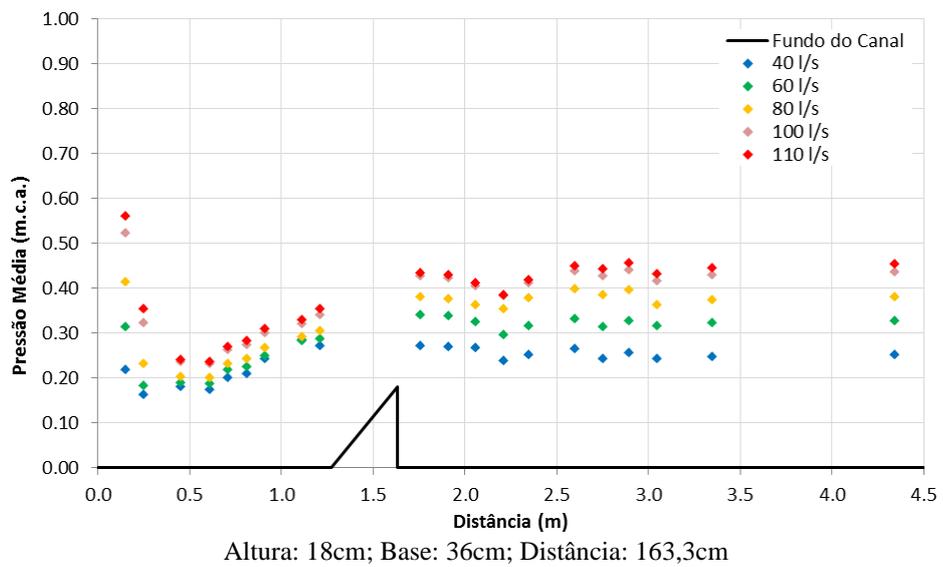
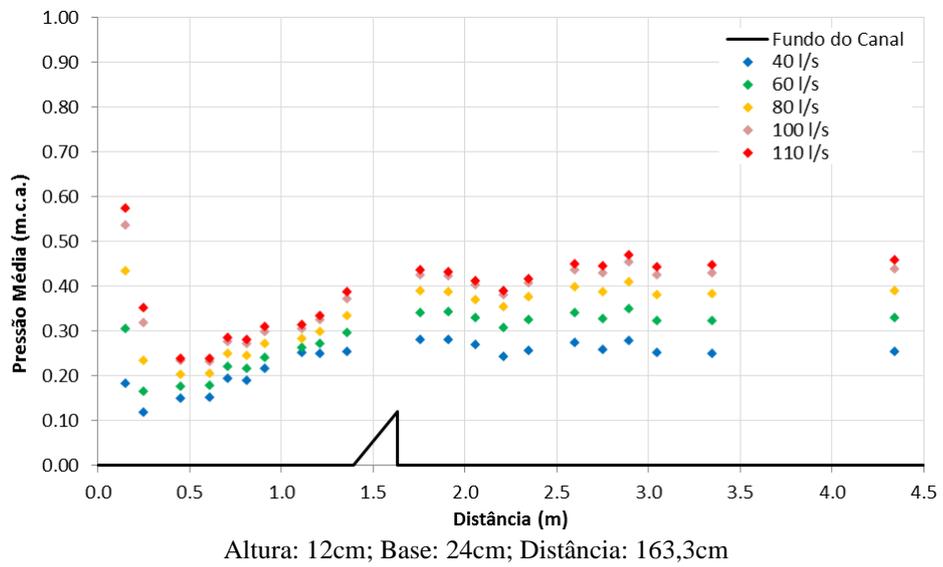
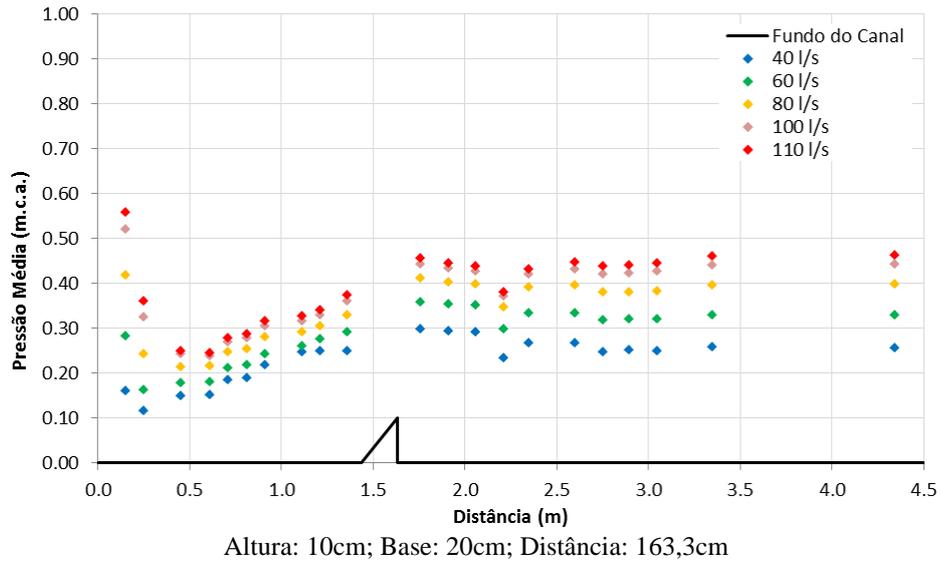
WIEST, R. A. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência**. Dissertação de mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1 jan. 2008.

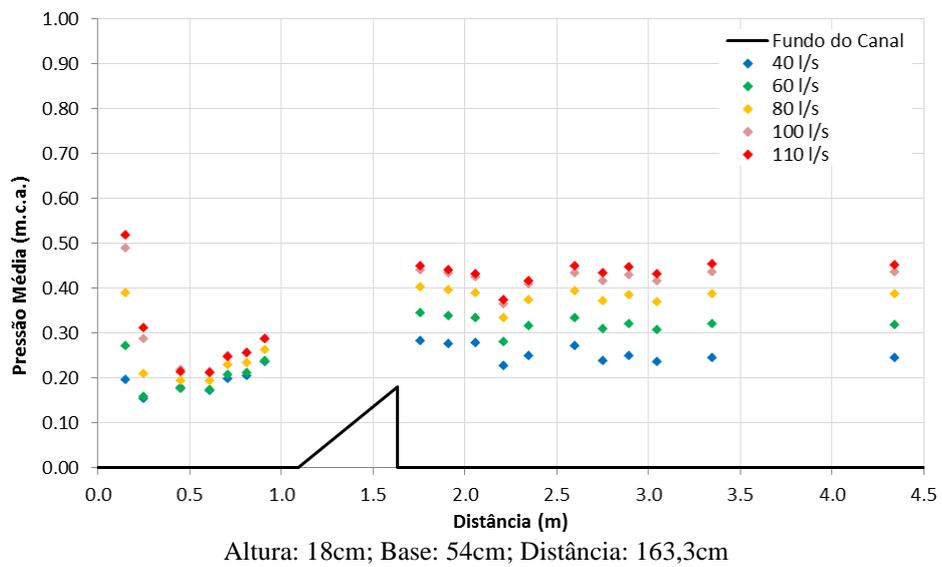
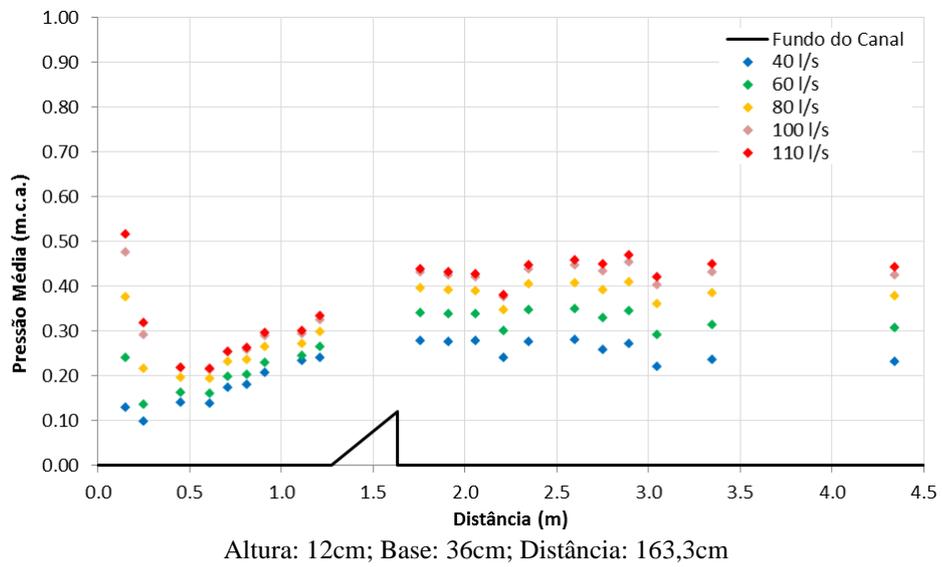
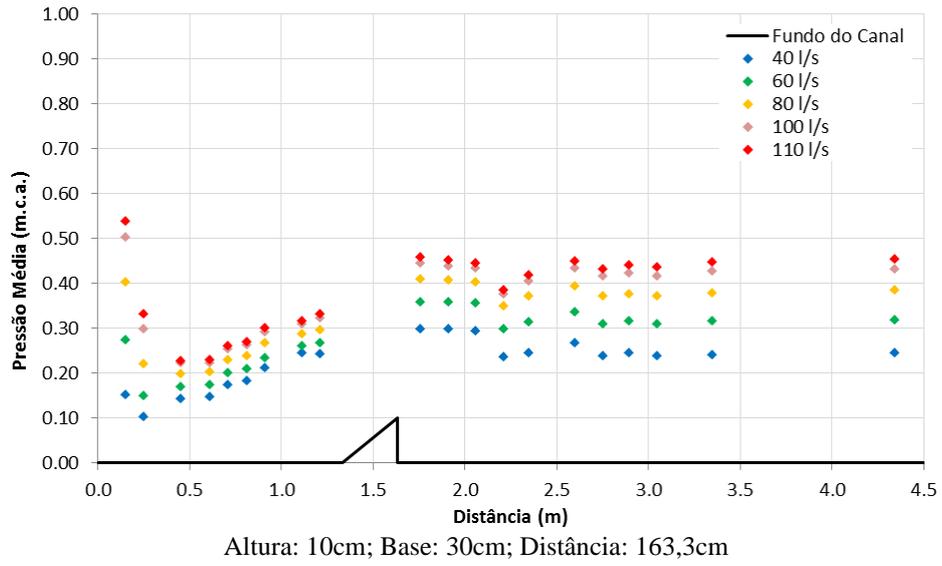
YUDITSKII, G. A. **Acção Hidrodinâmica de uma Lâmina Descarregadora Sobre Fragmentos de um Leito Rochoso e Condições de Ruptura Deste**. Tradução de J. A. Pintos de Campo. Lisboa: LNEC, 1983.

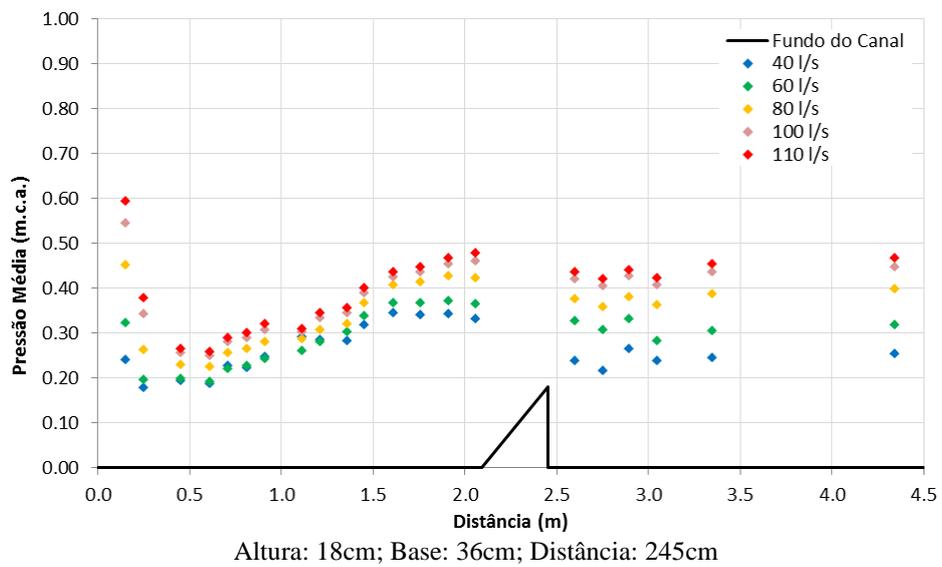
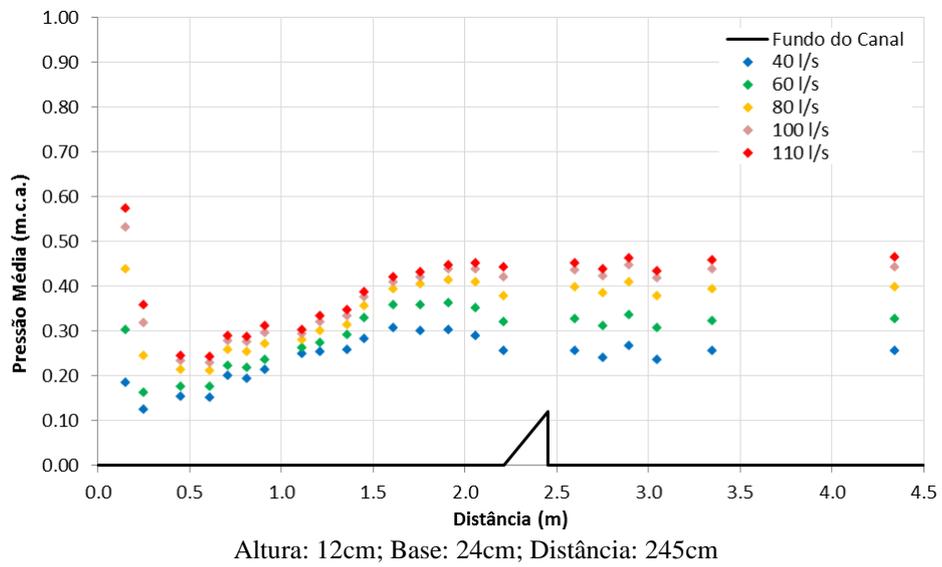
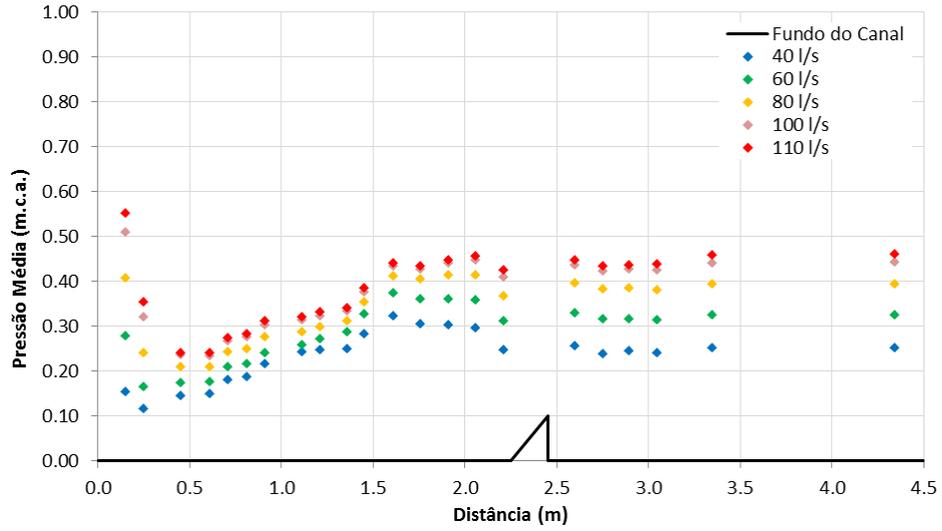
ANEXO I: GRÁFICOS DE PRESSÕES MÉDIAS

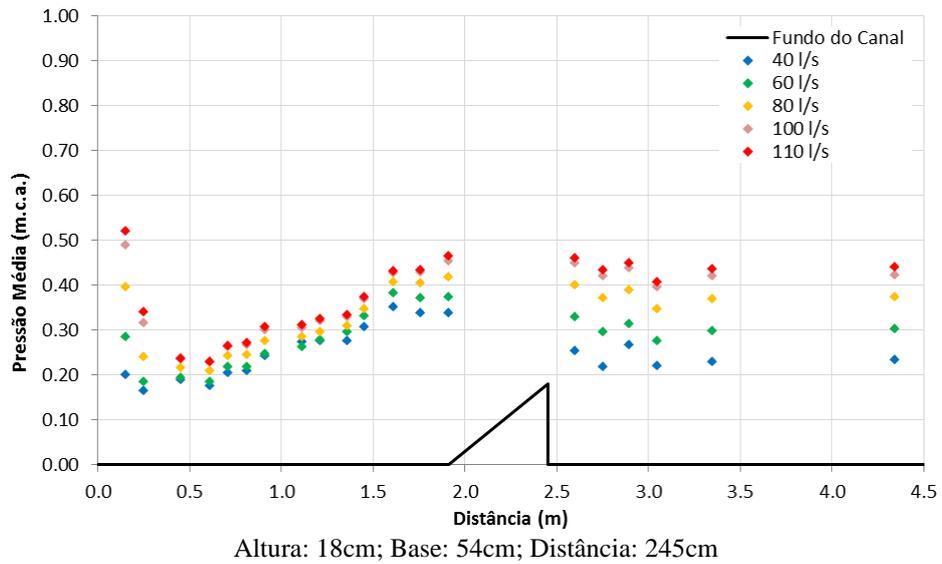
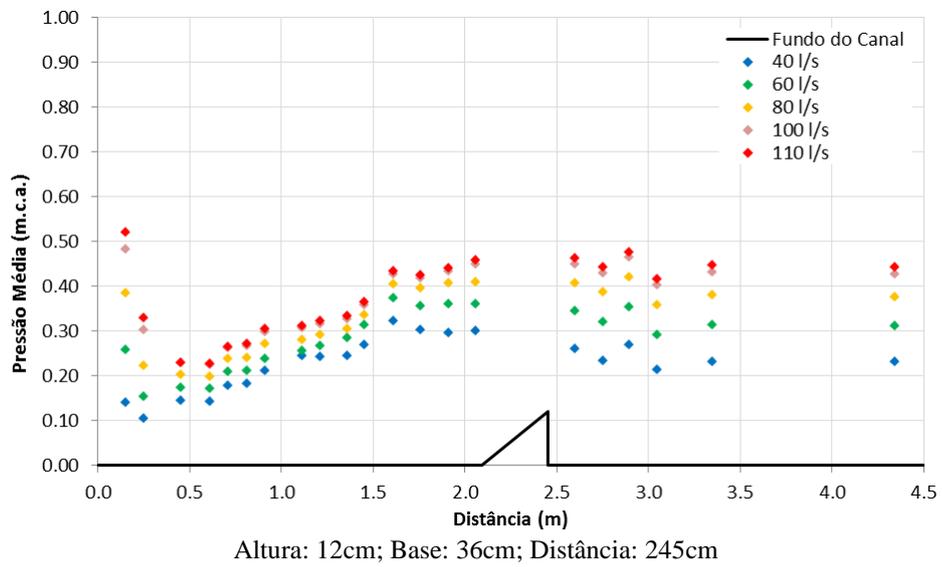
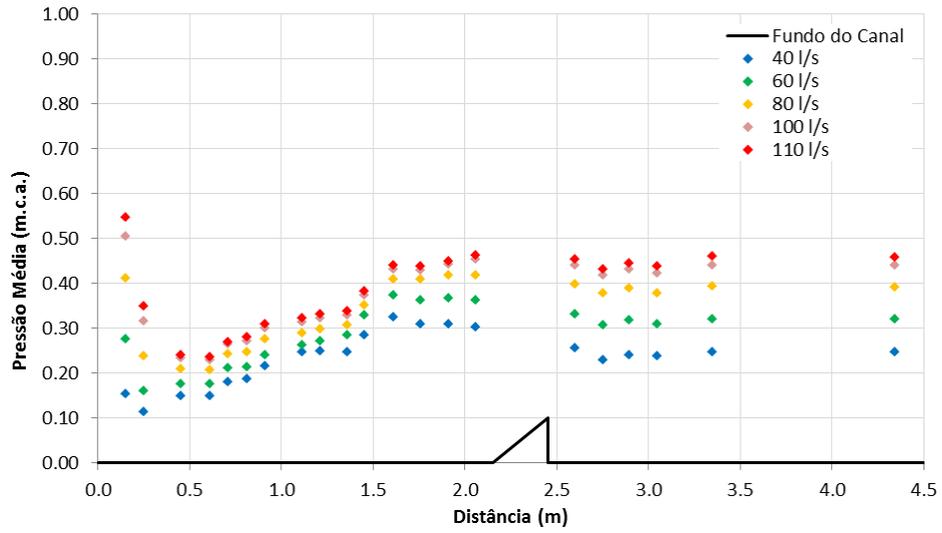




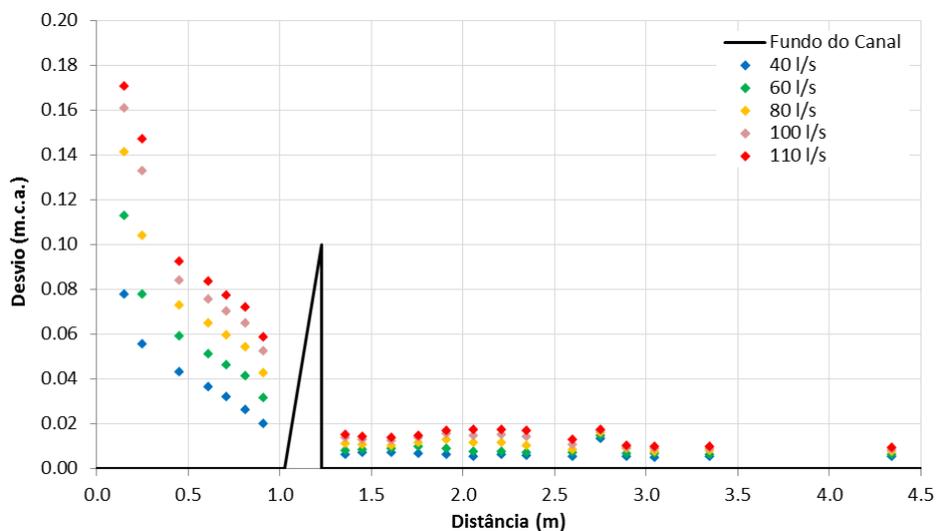




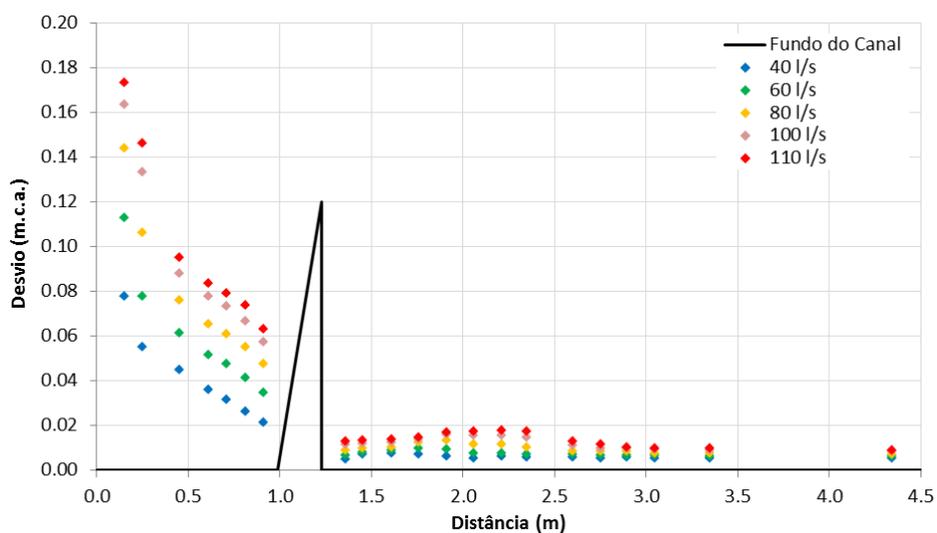




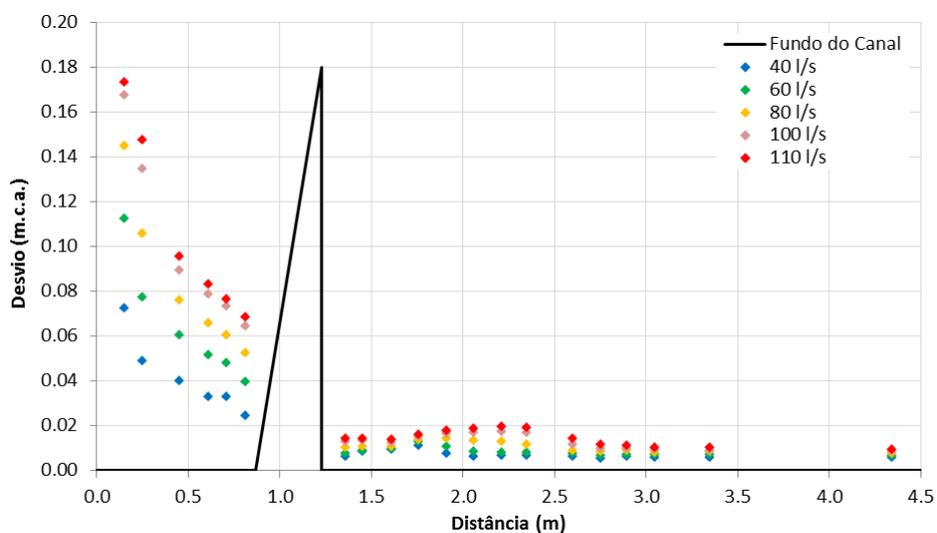
ANEXO II: GRÁFICOS DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO



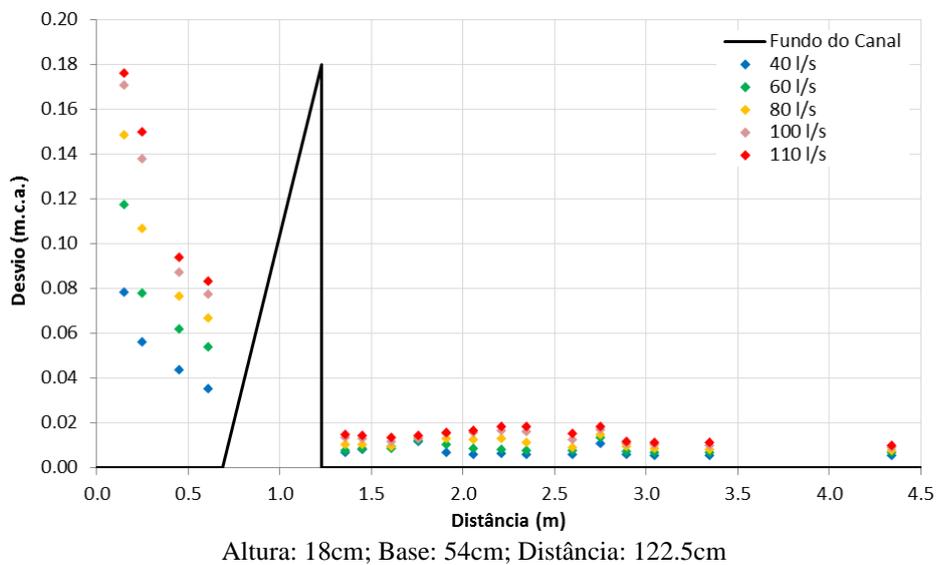
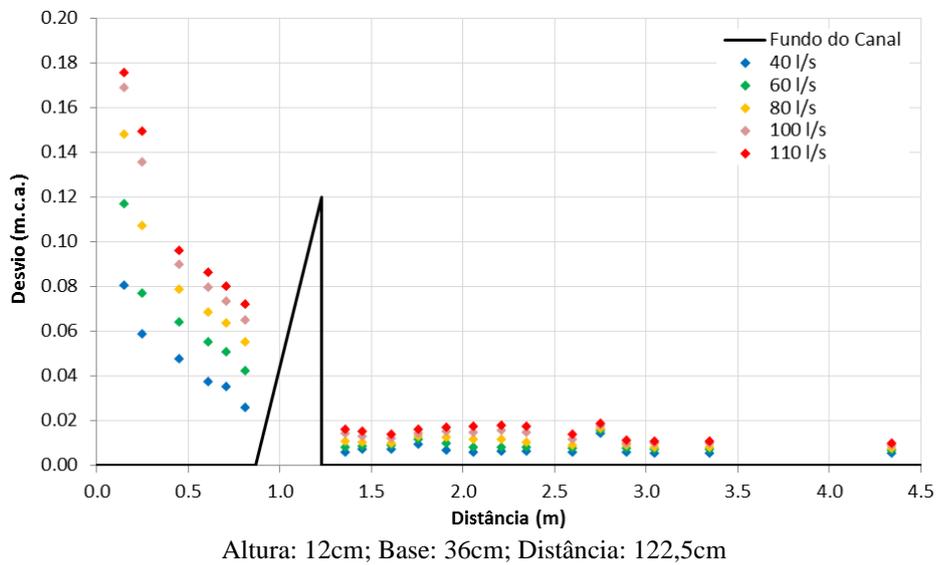
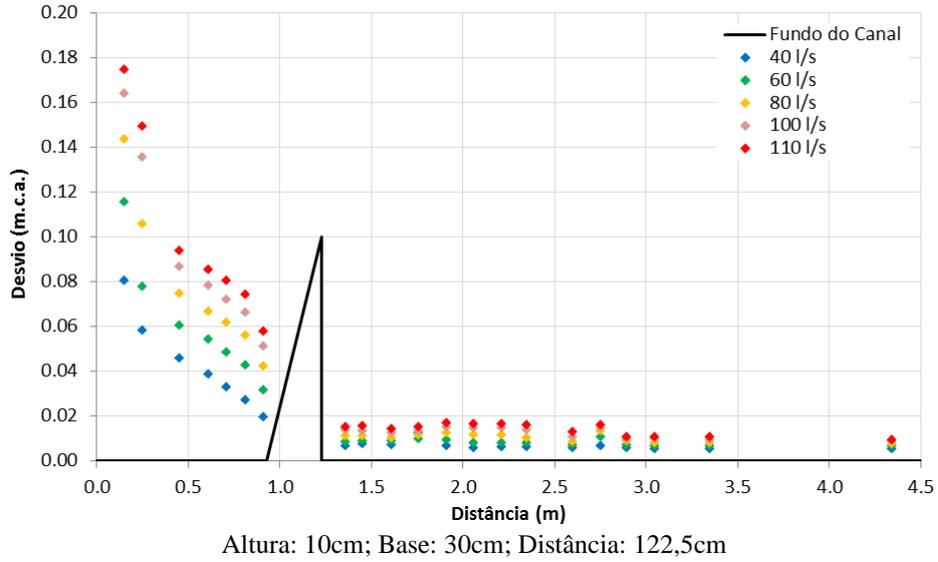
Altura: 10cm; Base: 20cm; Distância: 122,5cm

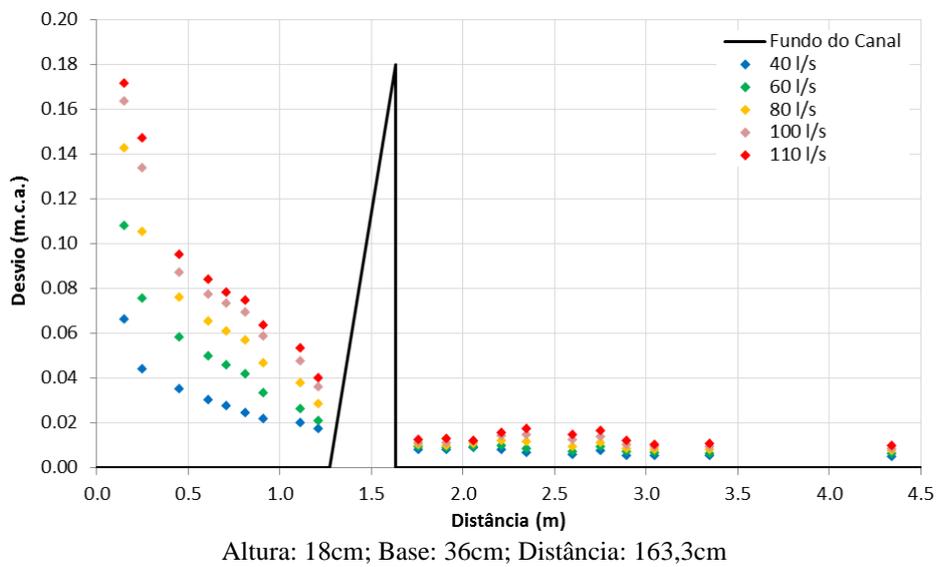
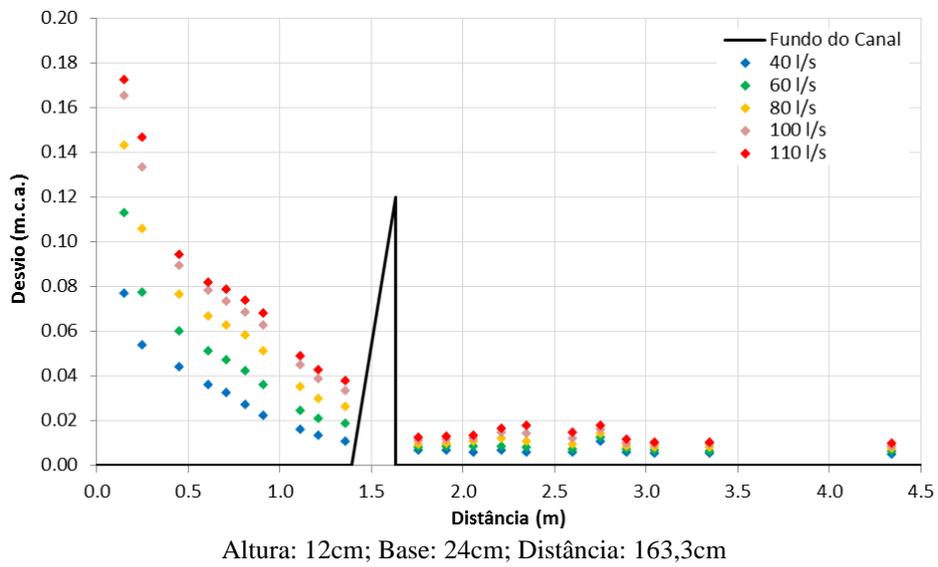
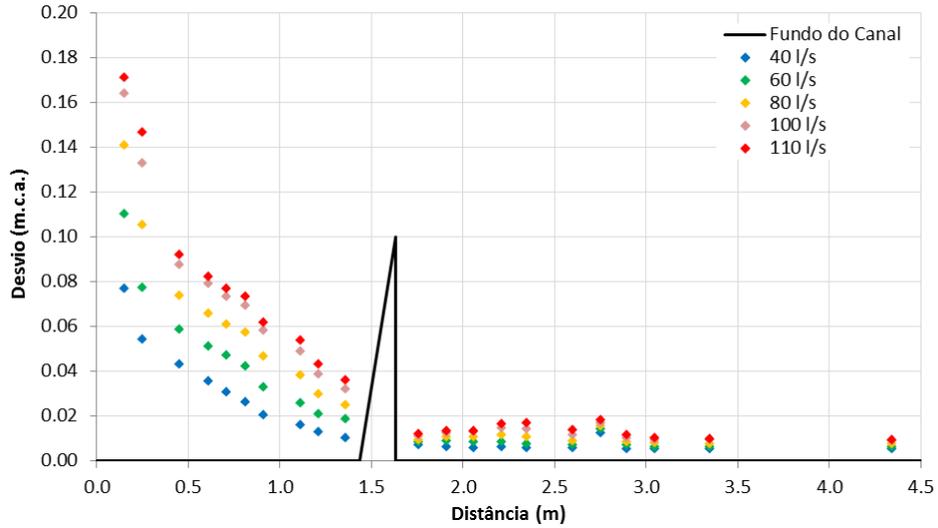


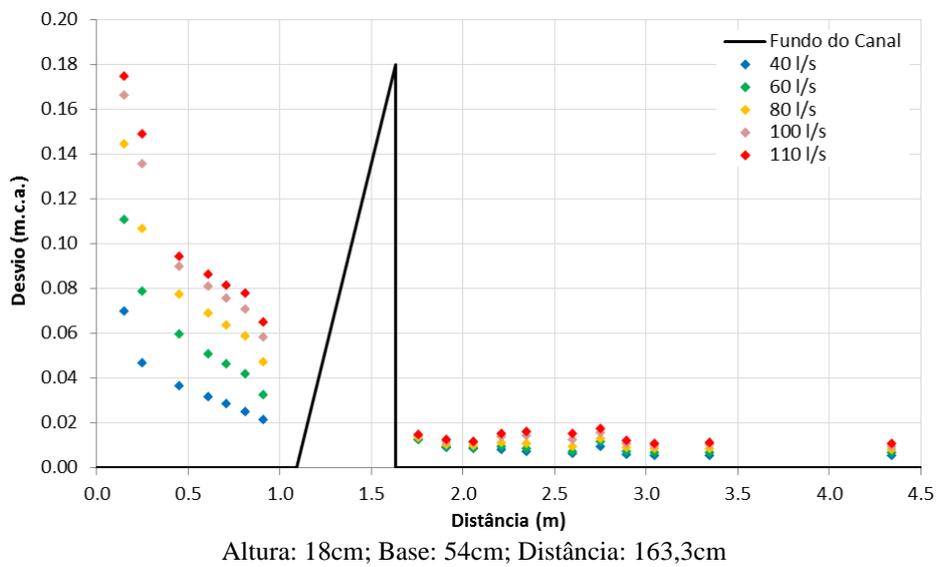
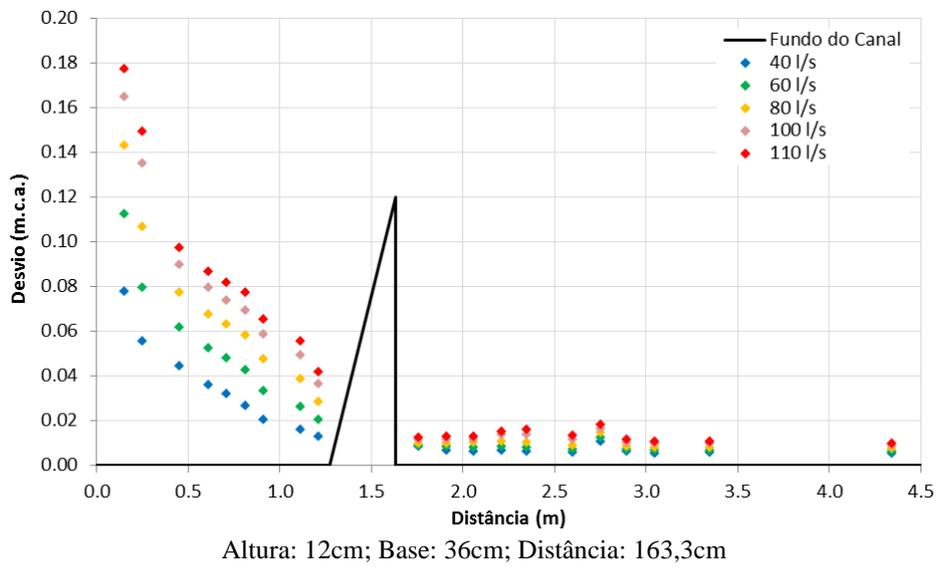
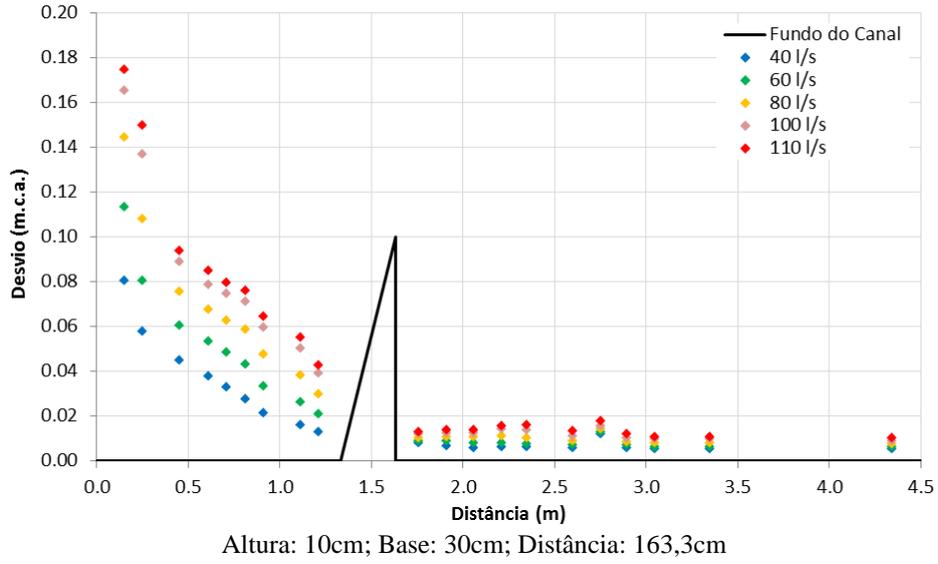
Altura: 12cm; Base: 24cm; Distância: 122,5cm

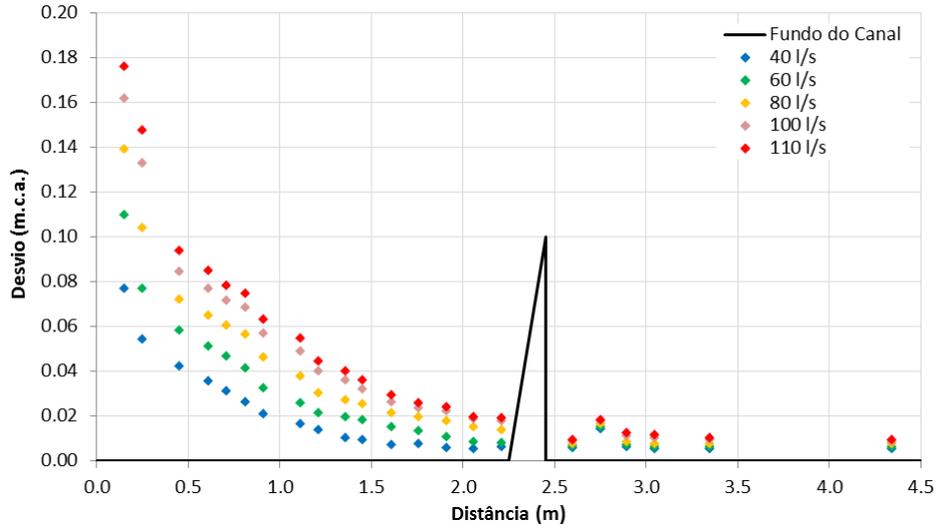


Altura: 18cm; Base: 36cm; Distância: 122,5cm

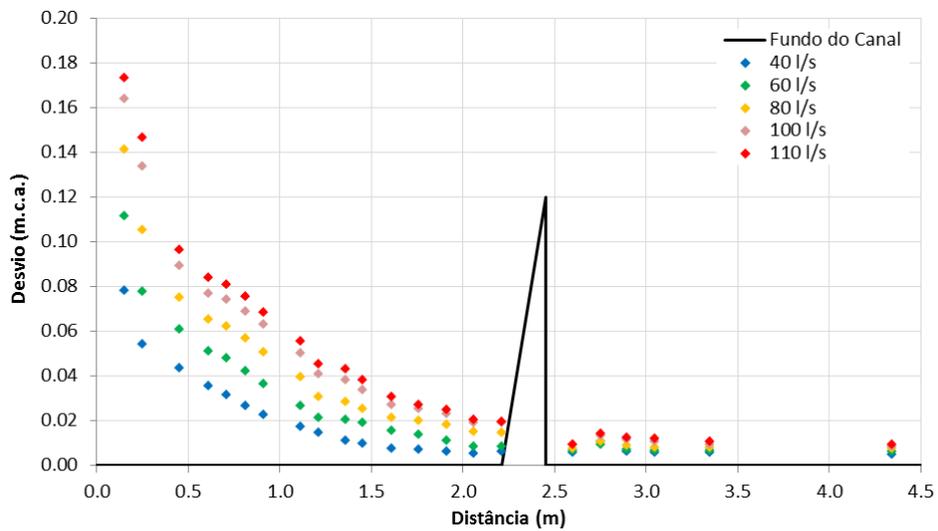




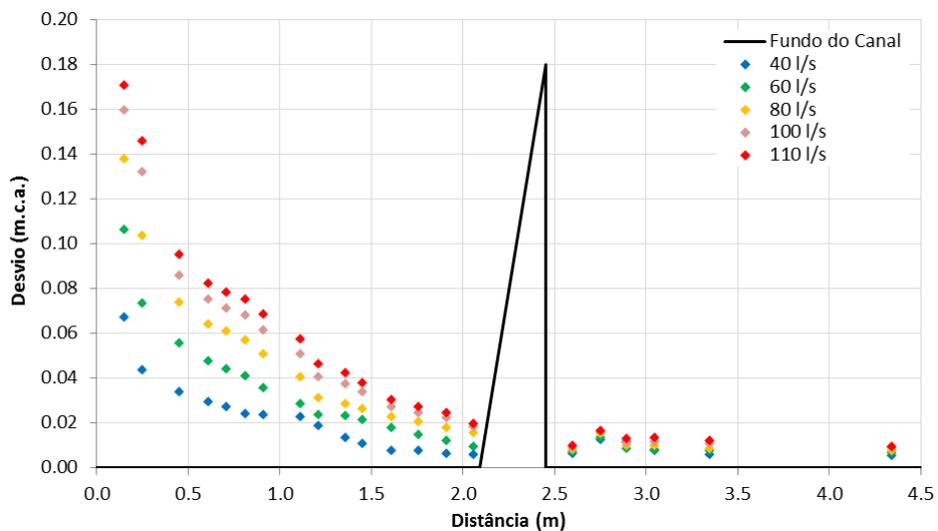




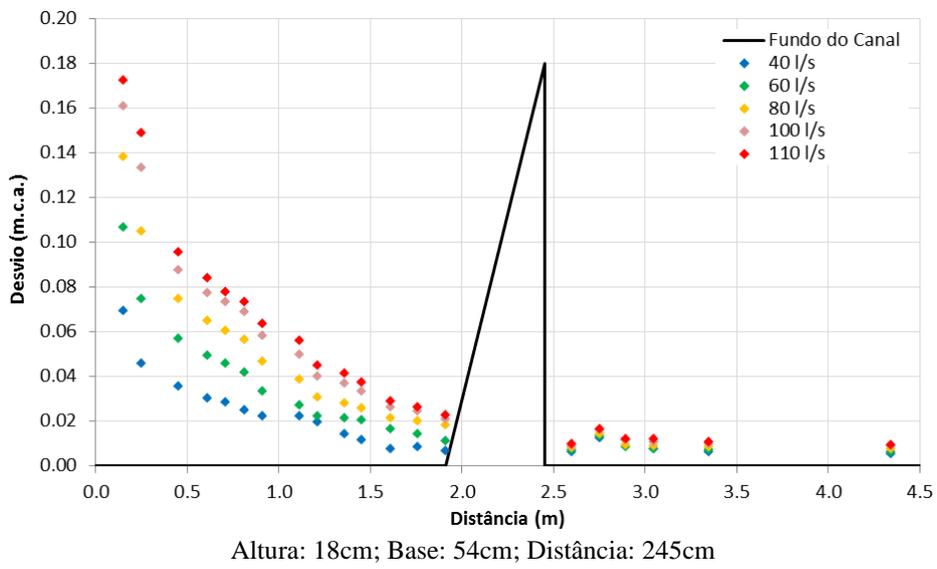
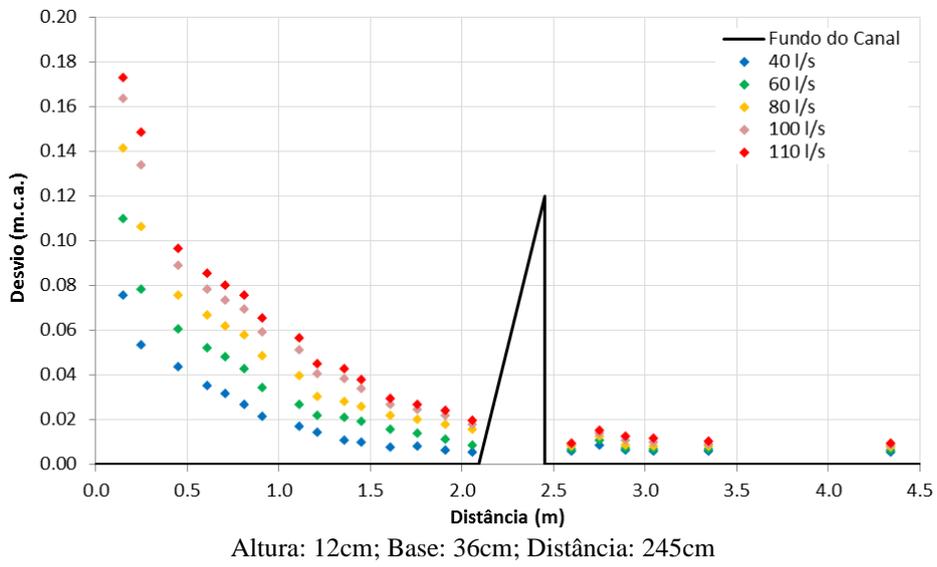
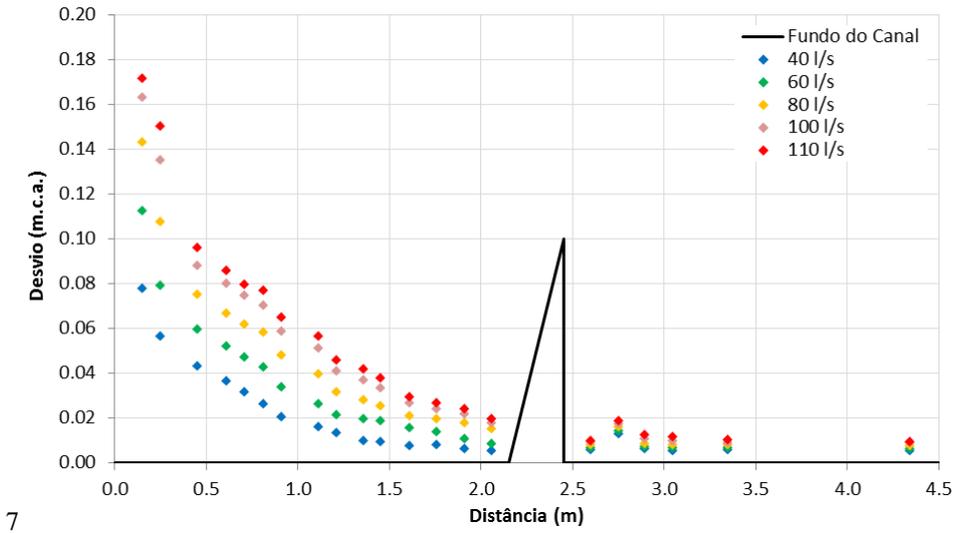
Altura: 10cm; Base: 20cm; Distância: 245cm



Altura: 12cm; Base: 24cm; Distância: 245cm

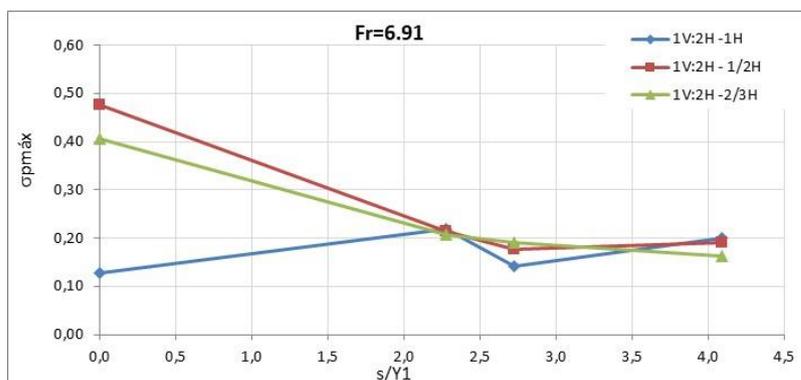
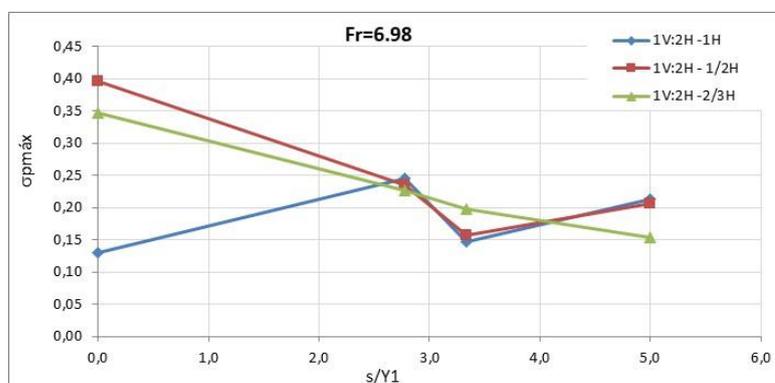
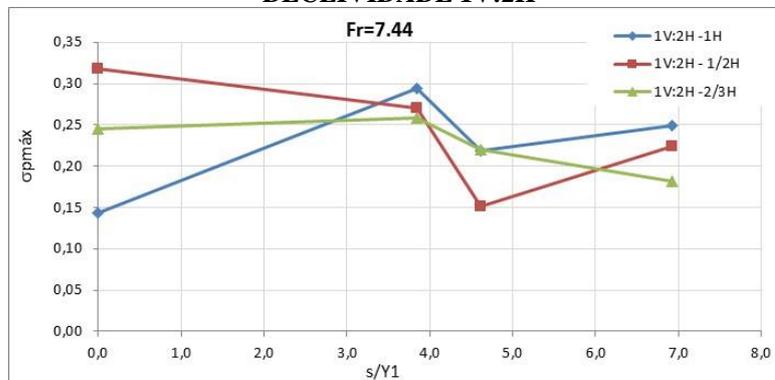


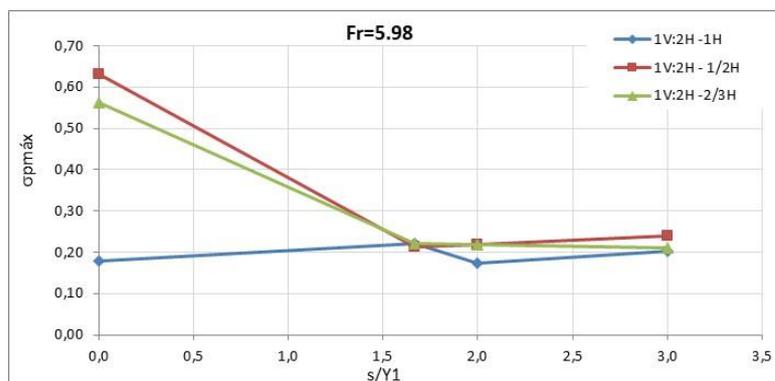
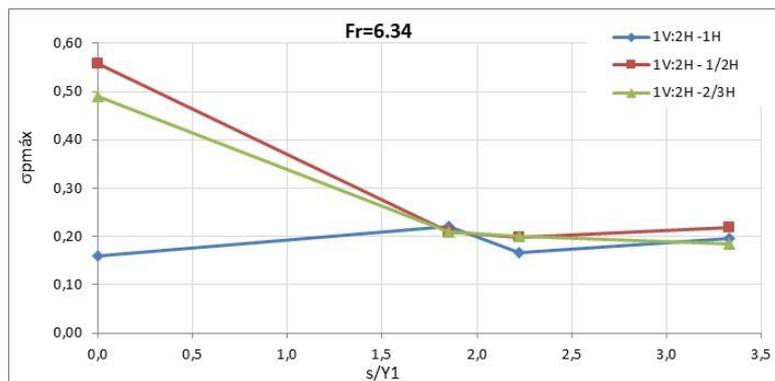
Altura: 18cm; Base: 36cm; Distância: 245cm



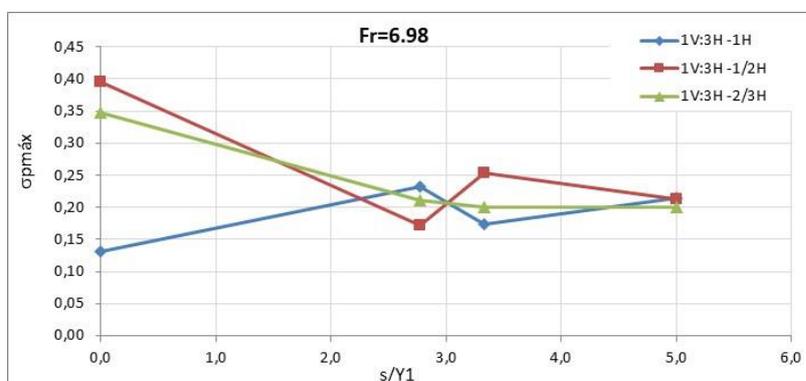
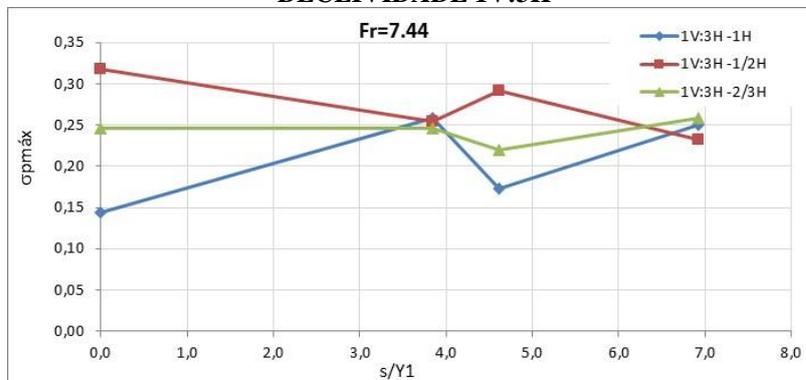
ANEXO III: MÍNIMAS FLUTUAÇÕES MÁXIMAS PARA CADA POSIÇÃO

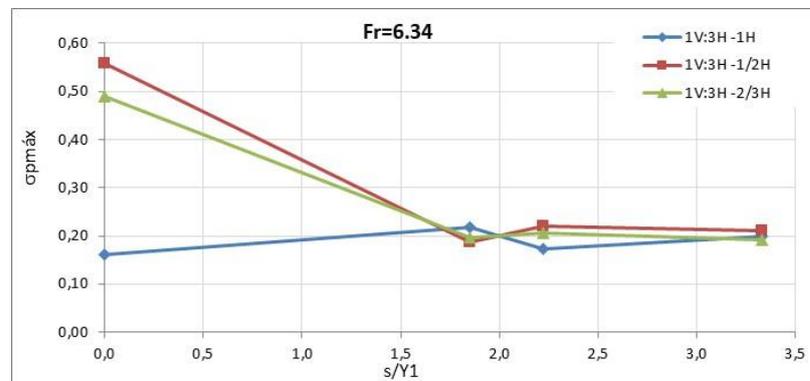
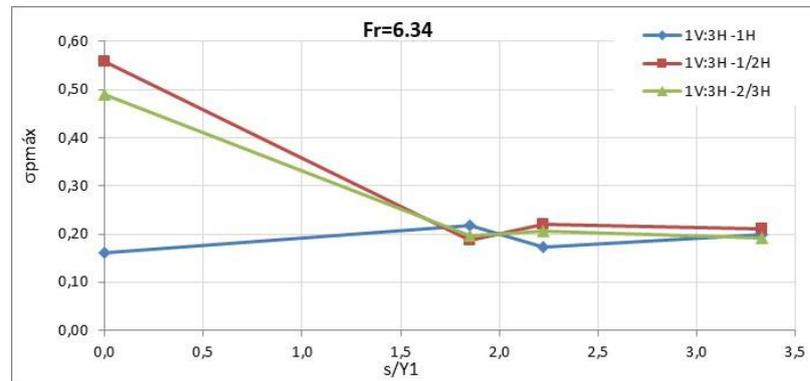
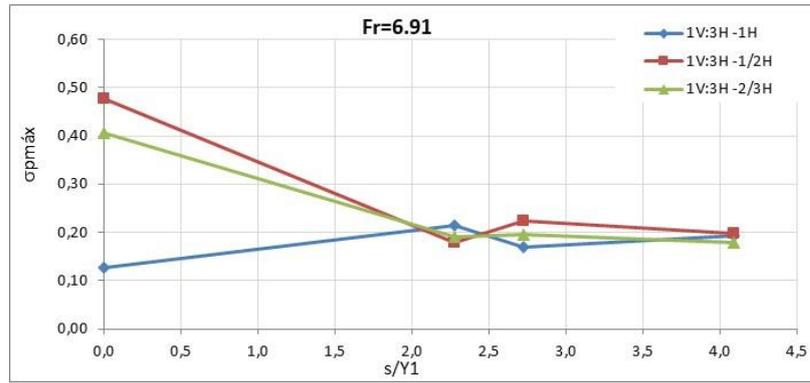
DECLIVIDADE 1V:2H





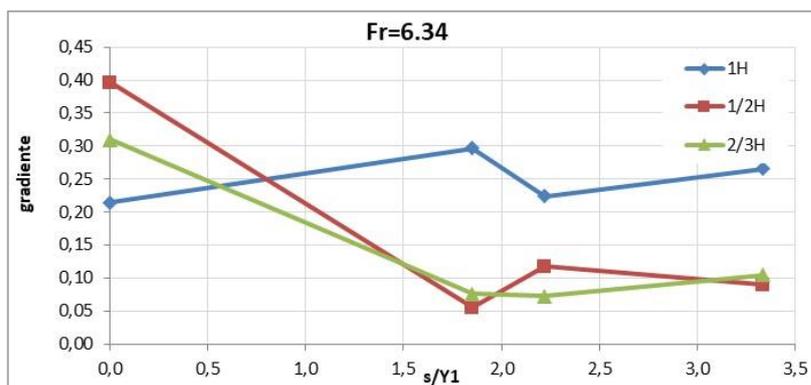
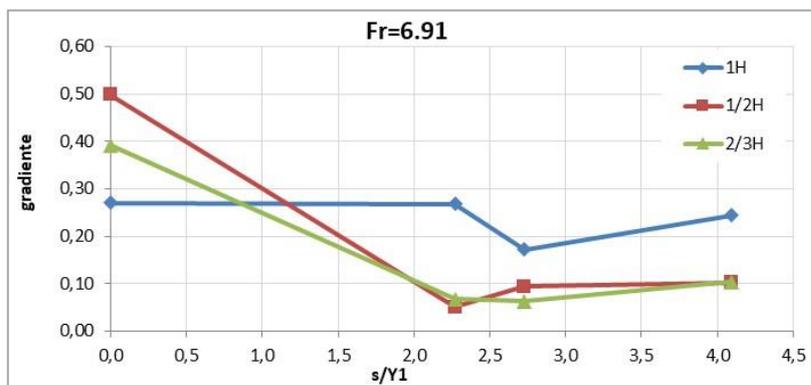
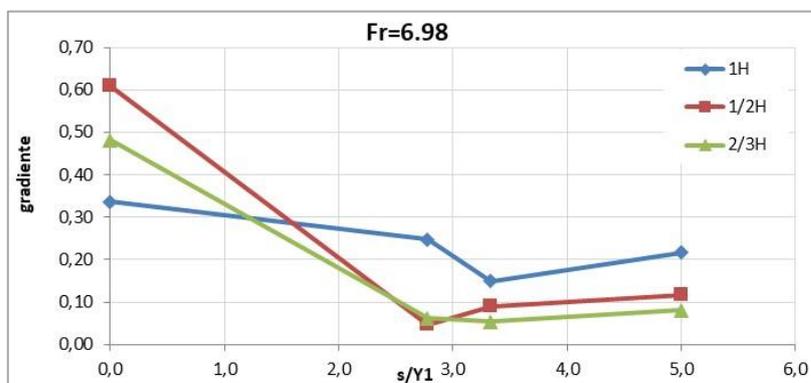
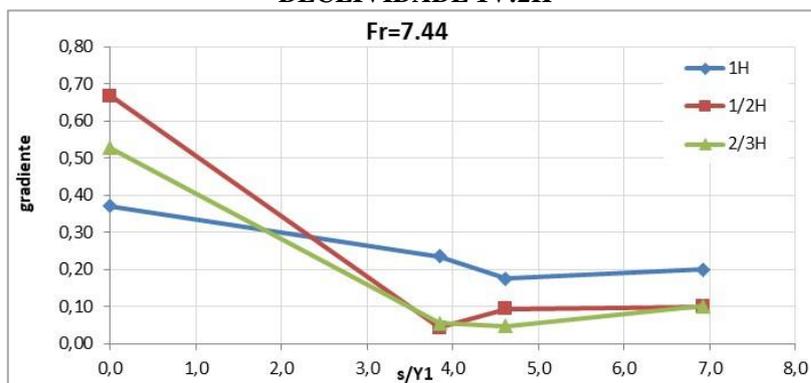
DECLIVIDADE 1V:3H

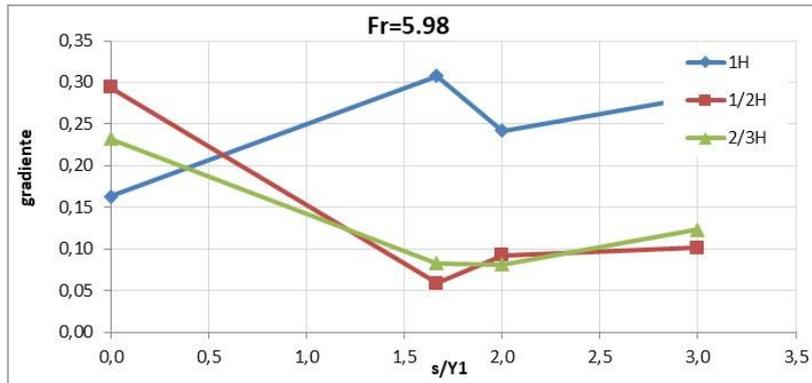




ANEXO IV: MENORES GRADIENTES PARA CADA POSIÇÃO

DECLIVIDADE 1V:2H





DECLIVIDADE 1V:2H

