

DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE SOLEIRAS TERMINAIS NUMA BACIA DE DISSIPAÇÃO A JUSANTE DE UM DESCARREGADOR EM DEGRAUS

DIOGO FURTADO DE MENDONÇA E ALMEIDA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA

Orientador: Professor Doutor Francisco de Almeida Taveira Pinto

Coorientador: Professor Doutor Marcelo Giulian Marques

JULHO DE 2014

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2013/2014

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ mipec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2013/2014 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2014.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

“Se tens que lidar com água, consulta primeiro a experiência, depois a razão.”

Leonardo Da Vinci

AGRADECIMENTOS

Como este trabalho não poderia ter sido desenvolvido apenas por uma pessoa só, dedico este pequeno espaço para agradecer a todos os que me ajudaram, cada um com o seu importante contributo, neste percurso já que todos eles foram parte integrante dele.

Sendo assim, estas são algumas das pessoas a quem gostaria de agradecer:

- Ao Professor Doutor Francisco Taveira Pinto por ter possibilitado a minha vinda para o Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) e pelo seu auxílio como orientador;
- Ao Professor Doutor Marcelo Giulian Marques que tive o prazer de conhecer, com quem gostei muito de trabalhar, não só por todo o seu conhecimento e experiência, mas também pela amizade demonstrada ao longo deste período e que me fez sentir em casa;
- Ao Professor Doutor Luís Endres e Professor Doutor Éder Teixeira pela sua ajuda sempre que necessitei de algo;
- À Eliane Conterato que sempre se mostrou disponível em auxiliar-me no que fosse necessário no que respeita à elaboração deste trabalho, já que este é uma continuação do seu estudo;
- A todos os colegas do LOH por me terem acolhido da melhor maneira possível, por me terem ajudado nos ensaios e por todos os bons momentos passados;
- Aos meus pais, irmã e avós, que apesar de toda a distância, foram sempre dando todo o apoio, força e incentivo para que o trabalho corresse pelo melhor.

RESUMO

O presente trabalho expõe uma análise de pressões numa bacia de dissipação de energia com soleira terminal a jusante de um descarregador em degraus, com o objetivo de definir critérios de dimensionamento dessa soleira, quer na sua altura, quer no seu posicionamento. Descarregadores em degraus têm vindo a ser utilizados com frequência, isto devido a técnicas inovadoras e práticas de construção que facilitam a sua elaboração, mas também por este tipo de descarregador contribuir para a dissipação de energia ao longo dos degraus, o que ajuda a uma diminuição do comprimento da bacia de dissipação. A colocação de soleiras terminais em bacias de dissipação tem o intuito de contribuir para o aumento da perda de energia, para além da perda provocada pelo descarregador. Esta combinação de dissipação de energia (descarregador e bacia de dissipação) é tida como uma técnica económica e segura. Contudo, as soleiras terminais pecam pela falta de critérios no seu dimensionamento, essencialmente no que toca à sua altura e à sua posição. Este estudo pretende demonstrar a influência da altura, posição e inclinação e, a partir daí, descobrir quais as características que uma soleira terminal deve apresentar de maneira a poder retirar o seu melhor rendimento. Os ensaios foram realizados para uma faixa de número de Froude variando entre 5,98 e 7,44, considerando duas alturas, três posições e 2 inclinações em complemento do estudo de Conterato (2014). Os ensaios levaram à conclusão de que a inclinação 1(V):3 (H) apresentam melhores resultados que a inclinação 1(V):1 (H)

PALAVRAS-CHAVE: Soleira terminal, bacia de dissipação, descarregador em degraus, ressalto hidráulico, dissipação de energia.

ABSTRACT

This study exposes a pressure analysis in a stilling basin with an end sill on the downstream of a stepped spillway, in order to define design criteria of such structure, whether for its height or position. Stepped spillways have been used for a while due to innovative methods of construction which help the creation of these structures, but this type of spillway also contributes for the energy dissipation along the steps, which will decrease the stilling basin length. The end sill may be used to contribute in the energy dissipation besides the spillway. These dissipation structures (stepped spillway and stilling basin) ensure an economic and safe technique. Although, end sills don't have too many dimension criteria, especially when it refers to their height and position. This experiment aims to show the influence of the height, position and inclination in an end sill and also find in which way we can take its best performance. These experiments have been done with Froude numbers between 5,98 and 7,44 considering two heights, three positions and two slopes in order to complete the study done by Conterato (2014). In conclusion, the end-sill that presented the best results was the end-sill with 1(V):3(H) slope.

KEYWORDS: End sill, stilling basin, stepped spillways, hydraulic jump, energy dissipation.

ÍNDICE GERAL

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
SÍMBOLOS	xvii

1. INTRODUÇÃO 1

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO 3

2.1. DISSIPACÃO DE ENERGIA 3

2.2. TIPOS DE ÓRGÃOS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA 3

2.2.1. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO 4

2.2.2. BACIAS DE DISSIPACÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO (ROLLER BUCKET) 6

2.2.3. BACIAS DE DISSIPACÃO POR MACRORUGOSIDADES 8

2.2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO 8

2.2.5. BACIAS DE DISSIPACÃO POR JATOS 9

2.3. DESCARREGADORES EM DEGRAUS 10

2.3.1. HISTÓRIA..... 10

2.3.2. TÉCNICA DE BETÃO COMPACTADO POR CILINDROS 11

2.3.3 TIPOS DE ESCOAMENTO EM DESCARREGADORES EM DEGRAUS..... 13

2.3.4. EMULSIONAMENTO DE AR SOBRE O DESCARREGADOR EM DEGRAUS 16

2.3.5. DISSIPACÃO DE ENERGIA EM DESCARREGADORES DE DEGRAUS 21

2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO..... 24

2.4.1. FORMAS DE RESSALTO HIDRÁULICO 24

2.4.2 ALTURAS CONJUGADAS 26

2.4.3. COMPRIMENTO DO RESSALTO..... 27

2.4.4 COMPRIMENTO DO ROLO 28

2.4.5. RESSALTO A JUSANTE DE DESCARREGADORES EM DEGRAUS..... 28

2.4.6. RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE E SUBMERSO 29

2.4.7. BACIAS DE DISSIPACÃO TIPO I 30

3. INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL 33

3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO 33

3.2. CRITÉRIO DE SEMELHANÇA PARA TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO 35

3.3. SOLEIRAS UTILIZADAS..... 36

3.3. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO..... 36

3.4. AQUISIÇÃO DE DADOS	37
3.5. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO ENSAIO	40

4. ANÁLISE DE RESULTADOS..... 43

4.1. ANÁLISE DE RESULTADOS DE PRESSÕES MÉDIAS EM BACIA COM SOLEIRA TERMINAL COM INCLINAÇÃO 1:1.....	43
4.1.1. COMPARAÇÃO DE ESTUDOS	43
4.1.2. PRESSÕES MÉDIAS BRUTAS	44
4.1.3. PRESSÕES MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS.....	47
4.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÕES EM BACIAS COM SOLEIRA TERMINAL COM INCLINAÇÃO 1:1.....	50
4.2.1. FLUTUAÇÕES MÉDIAS BRUTAS.....	50
4.2.2. FLUTUAÇÕES MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS	52
4.2.3. ANÁLISE DO PARÂMETRO ω	57
4.2.4. MÁXIMO VALOR DE FLUTUAÇÃO A JUSANTE DE UMA SOLEIRA TERMINAL	63
4.2.5. ANÁLISE DO MÁXIMO VALOR DE FLUTUAÇÃO A MONTANTE DA SOLEIRA.....	67
4.3. COMPARAÇÃO DE DIFERENTES INCLINAÇÕES DE SOLEIRA.....	71
4.3.1. PRESSÕES MÉDIAS BRUTAS	71
4.3.2. PRESSÕES MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS.....	73
4.3.3. FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO.....	73
4.3.4. ANÁLISE DO PARÂMETRO ω	78
4.3.5. MÁXIMO VALOR DE FLUTUAÇÃO A JUSANTE DE UMA SOLEIRA TERMINAL	81

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 87

5.1. CONCLUSÕES.....	87
5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
--	-----------

ANEXOS..... 93

ANEXO I.....	95
ANEXO II.....	101
ANEXO III.....	111
ANEXO IV	119
ANEXO V	123

ANEXO VI.....	133
ANEXO VII.....	143
ANEXO VIII.....	147
ANEXO IX.....	151
ANEXO X.....	155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema de ressalto hidráulico.....	4
Figura 2.2 - Bacia tipo I (Peterka, 1957).....	4
Figura 2.3 - Bacia tipo II (Peterka, 1957).....	5
Figura 2.4 - Bacia tipo III (Peterka, 1957).....	5
Figura 2.5 - Bacia tipo IV (Peterka, 1957).....	5
Figura 2.6 - Barragem de Bemposta (Portugal).	6
Figura 2.7 - Barragem Dona Francisca (RS-Brasil).	6
Figura 2.8 - Roller bucket dentado (Peterka, 1957).	7
Figura 2.9 - Roller bucket não dentado (Peterka, 1957).	7
Figura 2.10 - Escoamento com roller bucket dentado (Peterka, 1957).	7
Figura 2.11 - Escoamento com roller bucket não dentado (Peterka, 1957).	7
Figura 2.12 - Bacia de dissipação por macrorugosidades (Peterka, 1957).	8
Figura 2.13 - Bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1957).	8
Figura 2.14 – Bacia de dissipação por jatos com orifício de meio fundo (Peterka, 1957).	9
Figura 2.15 - Barragem de Itaipu-PR, Brasil.....	9
Figura 2.16 - Barragem de Arkananian, Grécia, 1300 a.C.....	10
Figura 2.17 - Barragem de New Croton, EUA.	10
Figura 2.18 - Distribuição de barragens pelo mundo utilizando BCC (Dunstan, 2003).	11
Figura 2.19 - Barragem de Shimajigawa e Willow Creek (www.damengineer.com).	12
Figura 2.20 - Barragem de Pedrógão (PERI)	12
Figura 2.21 - Nappe flow.....	13
Figura 2.22 - Escoamento em quedas sucessivas com ocorrência de ressalto hidráulico na soleira do degrau (Meireles, 2011).....	14
Figura 2.23 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato na soleira do degrau (Meireles, 2011).	14
Figura 2.24 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jato na soleira do degrau (Meireles, 2011).	14
Figura 2.25 - Escoamento deslizante sobre turbilhões com preenchimento parcial da soleira do degrau pelo escoamento secundário (Meireles, 2011).....	15
Figura 2.26 - Escoamento deslizante sobre turbilhões com preenchimento praticamente integral da soleira do degrau pelo escoamento secundário (Meireles, 2011).	15
Figura 2.27 - Escoamento deslizante sobre turbilhões com recirculação estável do escoamento secundário (Meireles, 2011).....	16

Figura 2.28 - Desenvolvimento do emulsionamento de ar num descarregador de degraus (Meireles, 2011). ...	17
Figura 2.29 - Foto do desenvolvimento do emulsionamento de ar.....	17
Figura 2.30 - Dimensões do degrau (Conterato, 2014).	19
Figura 2.31 - Adimensionalização de resultados do ponto de início de emulsionamento de ar do escoamento (Conterato, 2011).	20
Figura 2.32 - Adimensionalizações para alturas do escoamento sobre o descarregador em degraus, conforme diferentes autores (Conterato, 2011).	20
Figura 2.33 - Comparação entre a perda de carga no escoamento no descarregador em degraus e no descarregador de paramento convencional (Tozzi, 1992)	251
Figura 2.34 - Efeito da altura do degrau na perda de carga do escoamento (Tozzi, 1992)	252
Figura 2.35 - Dissipação de energia em relação à energia de montante (Sanagiotto, 2003)	253
Figura 2.36 - Diversas formas de ressalto hidráulico (Peterka, 1957).....	25
Figura 2.37 - Alturas conjugadas (Conterato, 2014).	26
Figura 2.38 - Perfis de ressalto hidráulico a jusante de descarregadores e/ou plano inclinado (Vischer e Hager, 1995).....	28
Figura 2.39 - Ressalto hidráulico livre e submerso formados a jusante de um descarregador (Teixeira, 2008). .	29
Figura 2.40 - Pressões médias adimensionalizadas (Marques et al, 1996).....	31
Figura 2. 41 - Flutuações de pressões médias adimensionalizadas (Maques et al, 1996).....	31
Figura 3.1 - Canal hidráulico.	34
Figura 3.2 - Esquema do canal hidráulico utilizado (Conterato, 2014).	34
Figura 3.3 - Esquema do descarregador e detalhes dos degraus.	35
Figura 3.4 - Soleiras utilizadas por Conterato (2014)	36
Figura 3.5 - Soleiras utilizadas no presente estudo 1(V):1(H) e 1(V):3(H).	36
Figura 3.6 – Dispositivo de medição de caudal e piezómetro.....	37
Figura 3.7 - Placa de aquisição utilizada.....	37
Figura 3.8 - Ficha técnica dos transdutores utilizados.	38
Figura 3.9 - Disposição de alguns transdutores na bacia de dissipação	38
Figura 3.10 - Exemplo de curva de calibração	39
Figura 3.11 - Esquema do posicionamento dos transdutores na bacia de dissipação (Conterato, 2014)	40
Figura 3.12 - Esquema mostrando as três diferentes posições dentro da bacia de dissipação (Conterato, 2014).....	40
Figura 4.1 - Comparação de estudos para a soleira de 10cm para uma vazão de 80L/s	43
Figura 4.2 - Distribuição longitudinal das pressões médias numa bacia do tipo I e numa bacia com soleira de 6 cm na posição 1/1H, para a vazão de 80L/s (Fr=6,91).....	44

Figura 4.3 – Imagens do escoamento com soleira de 6 cm, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$), nas três posições: 1/1H; 2/3H e 1/2H, respetivamente.....	45
Figura 4.4 - Imagens detalhadas da soleira de 6 cm, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$), nas três posições: 1/1H; 2/3H e 1/2H, respetivamente.	46
Figura 4.5 - Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para a soleira de 6 cm de altura, na posição 2/3H e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) em comparação com os resultados de bacia tipo I.....	48
Figura 4.6 - Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para as diferentes alturas de soleira, na posição 2/3H e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) em comparação com os resultados de bacia do tipo I.	48
Figura 4. 7 - Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para bacia com soleira de 6 cm e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) para diferentes posições, em comparação com a bacia do tipo I.	49
Figura 4. 8 – Detalhe da distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para bacia com soleira de 6 cm e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) para diferentes posições, em comparação com a bacia do tipo I.....	50
Figura 4.9 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão (desvio padrão da amostra) no fundo da bacia do tipo I com soleira terminal de 6 cm e posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	51
Figura 4. 10 – Detalhe da distribuição longitudinal das flutuações de pressão (desvio padrão da amostra) no fundo da bacia do tipo I com soleira terminal de 6 cm e posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	51
Figura 4.11 - Escoamento para uma vazão de 80L/s na posição 2/3H e inclinação de 1:1.	52
Figura 4.12 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleira terminal de 6 cm e posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	53
Figura 4.13 - Detalhe da distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleira terminal de 6 cm e posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	54
Figura 4.14 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleiras diferentes para a posição 1/2H, para vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	54
Figura 4.15 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleiras diferentes para a posição 2/3H, para vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	55
Figura 4.16 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleiras diferentes para a posição 2/3H, para vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	55
Figura 4.17 - Análise do trecho a jusante da soleira.....	56
Figura 4.18 - Flutuações de pressão em bacias do tipo I para diferentes vazões.	58
Figura 4.19 - Resultados do parâmetro ϖ em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	59
Figura 4.20 - Valores adimensionalizados de posições das soleiras por altura das soleiras adimensionalizadas (Conterato, 2014) e confirmados pelo presente estudo.....	60
Figura 4.21 - Valores de parâmetro ϖ em função do número de Froude, para soleira adimensionalizada nas 3 posições dentro da bacia (Conterato, 2014), valores confirmados pelo presente estudo.....	61
Figura 4.22 - Valores de parâmetro ϖ em função das posições das soleiras adimensionalizadas para as 5 vazões (Conterato, 2014).....	61
Figura 4.23 - Altura da soleira adimensionalizada para cada número de Froude, para a posição 1/2H (Conterato, 2014), valores confirmados pelo presente estudo.....	62

Figura 4.24 - Posição da soleira adimensionalizada (para cada número de Froude) que apresentou a menor parâmetro ϖ (Conterato, 2014).....	62
Figura 4.25 - Valores adimensionalizados de máxima flutuação em função da altura adimensionalizada da soleira para as 3 posições e uma vazão de 80L/s.....	63
Figura 4.26 - Menores valores de flutuação máxima adimensionalizada encontrados, em função da posição da soleira adimensionalizada.	65
Figura 4.27 - Valores de altura adimensionalizada em função da posição adimensionalizada, para cada número de Froude (Conterato, 2014).....	65
Figura 4.28 - Valores de altura adimensionalizada em função da posição adimensionalizada, para cada número de Froude.....	66
Figura 4.29 - Valores de altura de soleira adimensionalizados que fornecem o menor valor de flutuação máxima adimensionalizado, em função do número de Froude, em contraste com os resultados de Conterato (2014). .	67
Figura 4.30 - escoamento tipo Weir flow (Conterato, 2014).	67
Figura 4.31 - Altura ideal considerando as flutuações a montante da soleira para que as flutuações sejam mínimas e não ocorra escoamento tipo Weir Flow (Conterato, 2014).	69
Figura 4.32 - Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude. (Conterato, 2014)	69
Figura 4.33 - Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude.	70
Figura 4.34 - Posição ideal da soleira terminal em função do número de Froude (Conterato, 2014).	70
Figura 4.35 - Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 80L/s e posição 1/1H com inclinações diferentes.	71
Figura 4.36 - Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 110L/s e posição 2/3H com inclinações diferentes.	72
Figura 4.37- Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 110L/s e posição 2/3H com inclinações diferentes com maior detalhe a jusante da soleira.	72
Figura 4.38 - Comparação de pressões médias adimensionalizadas para um caudal de 80L/s e posição 2/3H com inclinações diferentes.	73
Figura 4.39 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão para as soleiras de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	74
Figura 4.40 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a montante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/2H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).	74
Figura 4.41 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a montante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).....	75
Figura 4.42 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a jusante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/2H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).	75
Figura 4.43 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a jusante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).	76
Figura 4.44 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão adimensionalizadas da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	76

Figura 4.45 - Pormenor da distribuição longitudinal de flutuações de pressão adimensionalizadas da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	77
Figura 4. 46 - Fotos do escoamento para uma soleira de 6 cm de altura de inclinação de 1:1 e 1:3, na posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).	78
Figura 4.47 - Resultados do parâmetro ϖ em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$) e comparação de inclinações para a soleira de 6 cm.	79
Figura 4.48 – Pormenor dos resultados do parâmetro ϖ em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$) e comparação de inclinações para a soleira de 6 cm.	79
Figura 4.49 – Resultados do parâmetro ϖ variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/1H.	80
Figura 4.50 - Resultados do parâmetro ϖ variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 2/3H.	80
Figura 4.51 - Resultados do parâmetro ϖ variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/2H.	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Equações sugeridas por diversos autores para posições de início de emulsão de ar e profundidade de escoamento nessa posição (adaptado de Conterato, 2014).....	18
Tabela 2.2 - Equações sugeridas para o fator de resistência.....	23
Tabela 2.3 - Equações sugeridas por diversos autores para determinação do comprimento do ressalto.	27
Tabela 2.4 - Equações sugeridas para o comprimento do rolo (Teixeira, 2003).	28
Tabela 3.1 - Distâncias entre cada transdutor e distância acumulada a partir do início da bacia de dissipação.....	39
Tabela 3.2 - Características dos ensaios com descarregadores em degraus.....	41
Tabela 4.1 – Posições relativas das soleiras	53
Tabela 4.2 – Valores de alturas de soleira adimensionalizados para cada número de Froude.	57
Tabela 4.3 - Menores valores do parâmetro ω	59
Tabela 4.4 – Alturas adimensionalizadas limite.	68
Tabela 4.5 - Alturas adimensionalizadas utilizadas.	68

SÍMBOLOS

D_h = diâmetro hidráulico do escoamento (m);
 E_p = energia em qualquer ponto ao longo do descarregador (m);
 E_m = energia a montante do descarregador (m);
 E_r = energia residual na base de um vertedouro em degraus (m);
 f = fator de resistência do descarregador em degraus;
 f_L = fator de resistência do descarregador liso
 Fr_1 = número de Froude correspondente à altura rápida;
 Fr_2 = número de Froude correspondente à altura lenta;
 F^* = número de Froude rugoso;
 g = aceleração da gravidade (m/s²);
 H_t = perda de carga ao longo do ressalto (m);
 H = altura do descarregador (m);
 h = profundidade sem emulsão de ar do escoamento sobre o descarregador (m);
 h_a = altura da lâmina d'água no ponto de início de emulsão de ar (m);
 h_c = altura crítica sobre a crista (m);
 h_n = altura normal do escoamento sobre o descarregador (m);
 h_j = energia a jusante do descarregador (m);
 K = altura de rugosidade do degrau (m);
 l = largura do degrau (m);
 L_a = distância de início de aeração a partir da crista ou início da ogiva do vertedouro (m);
 L_B = comprimento do ressalto com soleira (m);
 L_b = comprimento da 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_m = caudal no modelo (m³/s);
 Q_p = caudal no protótipo (m³/s);
 q_m = caudal específica no modelo (m²/s);
 q_p = caudal específica no protótipo (m²/s);

q = vazão específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

S = submergência;

s = altura da soleira (m);

s_L = altura adimensionalizada;

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

T_w = altura da lâmina de 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);

V_m = velocidade do escoamento no modelo (m/s);

V_p = velocidade do escoamento no protótipo (m/s);

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

x_{Ls} = posição da soleira adimensionalizada;

x_s = altura da soleira adimensionalizada;

x_p = distância adimensionalizada;

Y = diferença de cota entre a crista do vertedouro e o local onde está sendo avaliada a energia (m);

y_p = pressão adimensionalizada;

Y_1 = altura conjugada associada ao escoamento rápido (m);

Y_2 = altura conjugada associada ao escoamento lento (m);

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

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

x_p = distância adimensionalizada a partir do pé do descarregador (início do ressalto) (m);

α = inclinação do descarregador ($^\circ$);

σ = desvio padrão (m);

$\sigma_{p\text{máx}}$ = flutuação de pressão adimensionalizada máxima a jusante da soleira;

λ = razão entre as escalas geométricas de modelo e de protótipo;

ϖ = razão entre flutuação máxima a jusante da soleira terminal com a distância a que esta flutuação ocorre;

ΔE = variação de energia;

$\Delta x_{\text{máx}}$ = distância adimensionalizada entre o pé da soleira e o ponto de máxima flutuação

ABREVIATURAS

BC = Betão Convencional

BCC = Betão Compactado por Cilindro

CCR = Concreto Compactado a Rolo

IPH = Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LOH = Laboratório de Obras Hidráulicas

UFRGS = Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1

INTRODUÇÃO

Existem mais de 50 mil barragens no mundo com uma altura de queda superior a 15 metros e volume de acumulação superior a 3 milhões de m³ e a estimativa que este número aumente significativamente de modo a preencher a procura de recursos hídricos.

Na construção de uma barragem para um aproveitamento hidroelétrico, ou outro fim, uma das principais preocupações aquando da sua execução é saber de que maneira se vai processar a dissipação da energia do escoamento do descarregador, sempre que se estiver perante uma situação de descarga de um caudal cheia. Estas descargas resultam em grande energia na base da estrutura, podendo causar sérios danos como a erosão e puncionamento da estrutura, em função das grandes velocidades e variações de pressão. De maneira a mitigar estes danos, o escoamento deve dissipar o máximo de energia ao longo do descarregador ou na base da estrutura, antes de voltar ao leito do rio.

Na escolha e no dimensionamento de dissipadores deve-se ter em conta o desnível a ser vencido, o caudal descarregado, as características topográficas e geológicas a jusante do dissipador e condições de operação e manutenção. O descarregador em degraus, que permite que uma significativa parcela de energia seja dissipada ao longo do descarregador, através dos degraus, diminuindo a quantidade de energia a ser dissipada na bacia a jusante do mesmo. A dissipação de energia ao longo do descarregador pode chegar a 60% a 80% da energia total a montante, Tozzi (1992), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004) entre outros. A combinação de descarregadores em degraus com bacias de dissipação por ressalto hidráulico a jusante diminui parcela de energia a ser dissipada na bacia, o que permite obter estruturas menores e menos profundas, o que se traduz numa poupança económica.

Atualmente cerca de 30% das barragens em BCC (Betão compactado por cilindro) possuem descarregadores em degraus como forma de dissipação de energia, sendo na maioria dos casos adotado a jusante deste dissipador, bacias de dissipação por ressalto hidráulico com soleiras terminais. Entretanto são poucos os estudos que analisam a influência da soleira terminal na dissipação de energia.

Em função do que foi referido acima, este trabalho irá debruçar-se sobre a dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de um descarregador em degraus com a presença de uma soleira terminal na bacia de dissipação. O objetivo consiste na determinação das melhores características geométricas a serem adotadas para a soleira (altura e posição) em função do número de Froude do escoamento.

Esta dissertação vem dar continuidade ao projeto “DETERMINAÇÃO DE CRITÉRIOS DE DIMENSIONAMENTO DE SOLEIRA TERMINAL EM BACIA DE DISSIPACÃO A JUSANTE DE VERTEDOURO EM DEGRAUS”, elaborado por Eliane Conterato em 2014, como sua dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O trabalho experimental foi elaborado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), pertencente ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, onde se dispunha de um modelo reduzido de um descarregador não convencional de degraus, que permite estudar o fenômeno de dissipação de energia por ressalto hidráulico na bacia de dissipação.

O objetivo principal deste trabalho é verificar se a metodologia proposta por Conterato (2014) para determinação das características geométricas e posicionamento da soleira terminal contínua em bacia de dissipação a jusante de um descarregador em degraus é aplicável.

Para alcançar o objetivo foi realizado uma análise da influência da soleira terminal contínua na distribuição longitudinal de pressões médias e suas flutuações junto ao fundo de bacia de dissipação, a jusante do descarregador. Essa análise é composta por várias etapas, denominados de objetivos secundários do trabalho:

- Conferir os dados obtidos por Conterato (2014), para as seguintes condições:
 - verificação para as condições de pressão e suas flutuações para uma bacia sem soleira terminal (bacia Tipo I);
 - verificação para as condições de pressão e suas flutuações a montante e a jusante de soleira terminal com altura de 10 cm e posicionada nas mesmas posições (1H, 2/3H e 1/2H, onde H é a altura do paramento do descarregador).
- Verificação das condições de pressão e flutuações a montante e jusante da soleira terminal com altura de 6 cm e posicionada nas mesmas posições (1H, 2/3H e 1/2H, onde H é a altura do paramento do descarregador);
- Verificação das condições de pressão e flutuações a montante e jusante da soleira terminal com altura de 6 cm e inclinação 1:3, ao invés da inclinação 1:1 anteriormente utilizada em todas as soleiras, e posicionada nas mesmas posições (1H, 2/3H e 1/2H, onde H é a altura do paramento do descarregador);
- Comparação dos resultados obtidos e verificação da aplicabilidade da metodologia sugerida por Conterato (2014).

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO

2.1. DISSIPACÃO DE ENERGIA

Na construção de um aproveitamento hidroelétrico, mais concretamente em relação aos descarregadores de cheias, o principal objetivo passa pela restituição do caudal a jusante desse aproveitamento, onde se procura que este tenha um comportamento idêntico ao do escoamento natural do rio.

Esta obra vai originar, obviamente, um desnível entre as superfícies livres de água a montante e jusante, o que se traduz numa perda de carga que será maior quanto maior for este desnível. A principal perda de energia ocorre a jusante dos descarregadores, uma vez que estes não têm grande influência na perda de energia, a não ser que se trate de um caudal de cheia bastante reduzido, ou então se esteja perante um descarregador não convencional.

A dissipação de energia em excesso será feita por:

- Atrito do escoamento com as fronteiras;
- Turbulência do escoamento;
- Atrito e emulsão de jatos com o ar;
- Impacto e atrito de jatos com a lâmina de água a jusante.

É desejável que a turbulência originada não provoque erosões no leito do rio que possam, eventualmente, pôr em risco a estabilidade da obra. Caso ocorram, deverão estar bem afastadas da obra e sua fundação. O tipo de dissipação de energia a utilizar vai depender do tipo de aproveitamento em causa, dos valores dos caudais descarregados, das características topográficas e geológicas do local.

2.2. TIPOS DE ÓRGÃOS DE DISSIPACÃO DE ENERGIA

Segundo Ortiz (1982), os dissipadores de energia podem-se agrupar em dois grandes grupos:

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

2.2.1. Bacias de dissipação por ressalto hidráulico

As bacias de dissipação por ressalto hidráulico são estruturas que são desenvolvidas baseadas na teoria do ressalto hidráulico, onde se passa de um escoamento rápido para um escoamento lento, num determinado comprimento, designado de comprimento do ressalto, a dissipação de energia é feita por turbulência e atrito do escoamento com as fronteiras. A figura 2.1 ilustra o referido fenómeno.

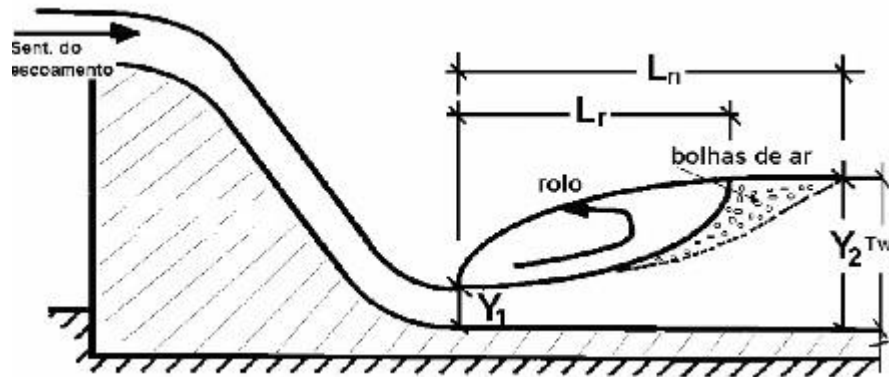


Figura 2.1 - Esquema de ressalto hidráulico.

Segundo o United States Bureau of Reclamation (USBR) existem quatro tipos de bacia, que se podem dividir em dois grupos: a bacia tipo I, que não possui qualquer tipo de obstáculos (figura 2.2) e as bacias tipo II, III e IV (figuras 2.3, 2.4 e 2.5, respetivamente). Estas últimas três bacias utilizam acessórios, tais como blocos de queda (*Chute Block*), blocos de impacto (*Baffle Piers*) ou soleiras terminais, dentadas ou não (*End Sill- dented or not*), de maneira a diminuir o comprimento do ressalto e consequentemente o comprimento da bacia que conduzirá, provavelmente, a opções mais económicas. As referidas bacias apresentam os seguintes obstáculos:

- Bacia tipo II: blocos de queda e soleira terminal com dentes;
- Bacia tipo III: blocos de queda, blocos de impacto e soleira terminal;
- Bacia tipo IV: blocos de queda e soleira terminal.

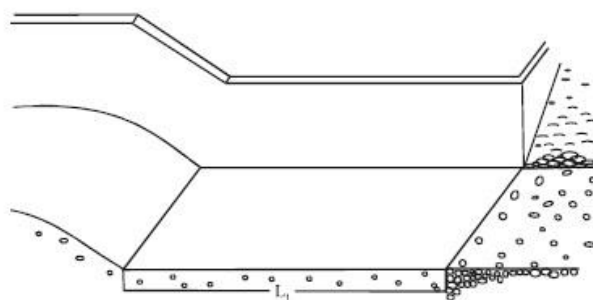


Figura 2.2 - Bacia tipo I (Peterka, 1957).

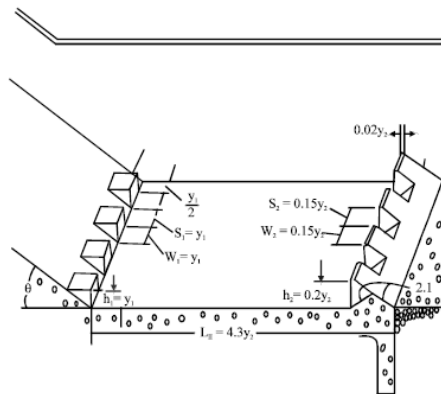


Figura 2.3 - Bacia tipo II (Peterka, 1957).

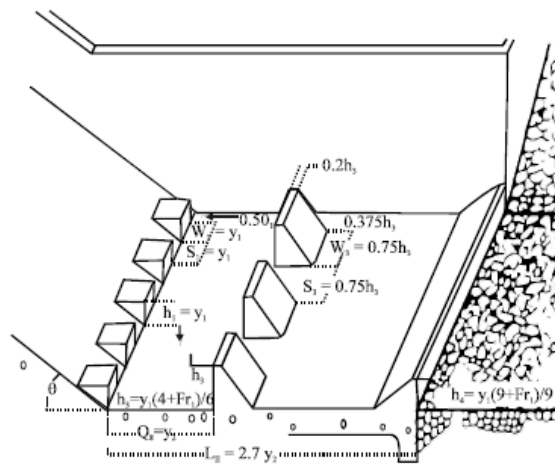


Figura 2.4 - Bacia tipo III (Peterka, 1957).

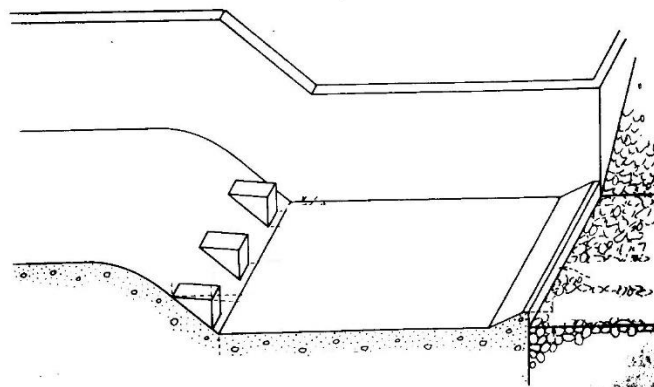


Figura 2.5 - Bacia tipo IV (Peterka, 1957).

Nas figuras 2.6 e 2.7 encontram-se dois exemplos de barragens que possuem bacias de dissipação por ressalto hidráulico, um exemplo português e brasileiro respectivamente.



Figura 2.6 - Barragem de Bemposta (Portugal).



Figura 2.7 - Barragem Dona Francisca (RS-Brasil).

2.2.2. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR TRAMPOLIM SUBMERSO (ROLLER BUCKET)

Na eventualidade de os níveis do escoamento a jusante não serem os necessários para ocorrer o ressalto hidráulico, podendo o nível ser superior, ocorrendo assim um afogamento do ressalto, poderá ser utilizada a possibilidade do trampolim submerso. Esta forma de dissipação de energia origina dois rolos de eixo horizontal, em sentidos diferentes, onde ocorrerá a dissipação de energia.

Este método de dissipação de energia pode apresentar-se das duas formas: dentado (figura 2.8) e não dentado (figura 2.9). Caso seja dentado, o escoamento atravessa o espaço existente entre os dentes, sendo dispersado para jusante, não contribuindo para o rolo de jusante que tem menores dimensões (figura 2.10). Por outro lado, sendo não dentado, o escoamento é projetado para cima criando um cachão (*boil*) (figura 2.11) à superfície e um rolo a jusante junto ao fundo, sendo o material do leito do rio arrastado de jusante para montante provocando o desgaste da estrutura.

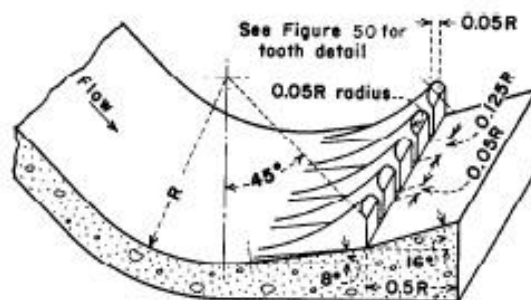


Figura 2.8 - Roller bucket dentado (Peterka, 1957).

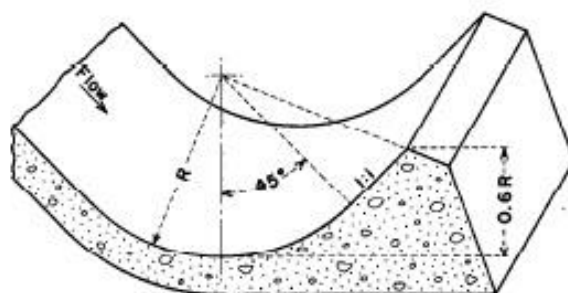


Figura 2.9 - Roller bucket não dentado (Peterka, 1957).

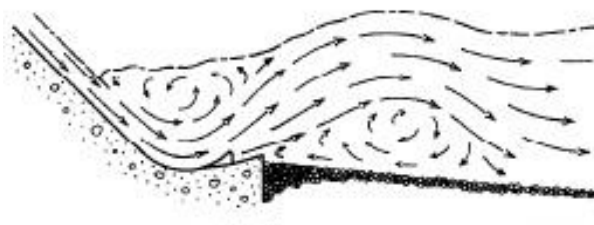


Figura 2.10 - Escoamento com roller bucket dentado (Peterka, 1957).



Figura 2.11 - Escoamento com roller bucket não dentado (Peterka, 1957).

2.2.3. BACIAS DE DISSIPACÃO POR MACRORUGOSIDADES

Este método de dissipação consiste numa rampa onde estão colocados blocos, devidamente dimensionados consoante o caudal a ser descarregado ao longo da mesma, que têm como objetivo provocar a perda de carga no escoamento, como ilustra a figura 2.12. Essa perda é provocada pelos sucessivos impactos do escoamento nos vários blocos ao longo da rampa, evitando a aceleração do escoamento.

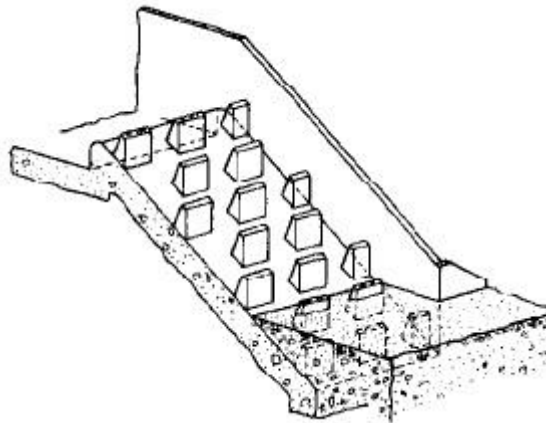


Figura 2.12 - Bacia de dissipação por macrorugosidades (Peterka, 1957).

2.2.4. BACIAS DE DISSIPACÃO POR IMPACTO

Este tipo de bacia é normalmente utilizado nas extremidades de condutas sob pressão, contudo também se utiliza em situações de superfície livre com as devidas modificações. A dissipação de energia é dada pelo impacto do escoamento numa viga de secção em “L” colocada na frente da secção de saída da conduta, como mostra a figura 2.13.

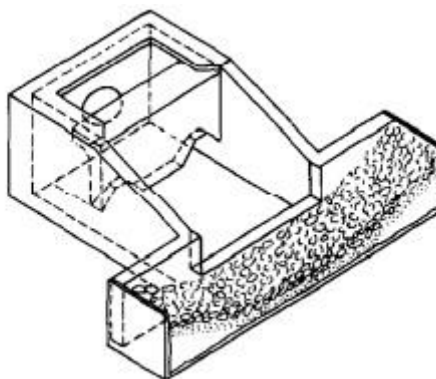


Figura 2.13 - Bacia de dissipação por impacto (Peterka, 1957).

2.2.5. BACIAS DE DISSIPÇÃO POR JATOS

Este modo de dissipação de energia pode ser uma alternativa muito económica, se as condições topográficas e geológicas o permitirem, já que dispensa a construção de uma bacia de dissipação a jusante do lançamento do jato de água. A dissipação pode ser feita diretamente no leito do rio, pela formação de fossas de erosão e ocorre pelo contato do jato com o ar e no interior do colchão de água formado a jusante do descarregador.

O recurso a este tipo de dissipação de energia implica uma análise das características do leito do curso de água. A perda de energia pode apresentar-se sob a forma de queda em lâmina livre e os trampolins conhecidos como dissipação em salto de esqui, ou também, pela interferência de dois jatos, conhecida como dissipação por jatos cruzados. A figura 2.14 representa um esquema de um tipo de bacia de dissipação por jato, neste caso com orifício de meio fundo, já a figura 2.15 é um exemplo de uma barragem onde se encontra este modo de dissipação de energia.

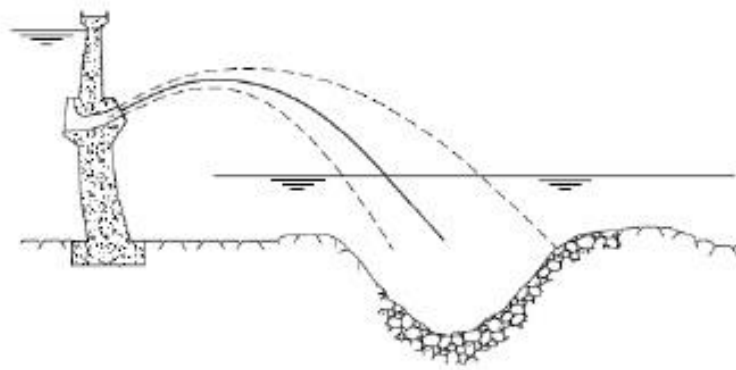


Figura 2.14 – Bacia de dissipação por jatos com orifício de meio fundo (Carvalho, 2013).



Figura 2.15 - Barragem de Itaipu-PR, Brasil (www.damengineer.com).

2.3. DESCARREGADORES EM DEGRAUS

2.3.1. HISTÓRIA

A utilização de descarregadores em degraus tem como principal objetivo a dissipação de energia. Segundo Chanson (2003), a primeira obra deste género remonta a vários séculos atrás e foi construída na Grécia em 1300 a.C. (figura 2.16), contudo acredita-se que a sua forma não tinha como essencial finalidade dissipar energia.



Figura 2.16 - Barragem de Arkananian, Grécia, 1300 a.C. (Chanson, 1994)

Sorensen (1985) afirma que a primeira barragem com o objetivo de dissipar a energia foi a barragem de New Croton no estado de Nova Iorque nos Estados Unidos da América (figura 2.17), construída no período entre 1892 e 1906, sendo a que apresentava a maior altura de queda no mundo (91m).



Figura 2.17 - Barragem de New Croton, EUA (www.damengineer.com).

2.3.2. TÉCNICA DE BETÃO COMPACTADO POR CILINDROS

Este tipo de dissipadores de energia ganhou mais notoriedade na segunda metade do século XX, quando surgiu uma nova técnica de construção, a técnica de betão compactado por cilindros (BCC), ou, como é conhecida no Brasil, concreto compactado a rolo (CCR).

Este betão é um material muito seco consolidado por vibração muito forte pelos cilindros vibradores usados na compactação dos solos. A sua diferença para o betão convencional (BC) não passa só pelo método de colocação, mas também pela sua consistência, de maneira a permitir a circulação dos cilindros, e pela sua composição, já que o BCC possui uma dose de cimento mais reduzida que o BC e as condições de fabrico, transporte e condições de compactação são distintas.

Esta técnica começou a ser desenvolvida nos finais dos anos 70 e rapidamente o bom desempenho que apresentava começou a despertar o interesse das várias construtoras, principalmente devido à sua rapidez de construção, à sua menor área de cofragem e à economia associada ao reduzido volume de material utilizado (cerca de 20 a 40% e 10 a 25% a menos que o betão convencional e que uma barragem de aterro, respetivamente).

Existe uma grande preocupação no conhecimento das propriedades deste material, de forma a melhorar as suas características e aumentar a confiança na sua aplicação. É um material muito comum na construção/reabilitação de barragens e que tem vindo a ser cada vez mais utilizado com o passar do tempo. Segundo Dunstan (2003) até 2002, existiam cerca de 250 barragens espalhadas pelo mundo utilizando esta técnica (figura 2.18), em particular na China, Japão, EUA e Brasil. Já na Europa, a Espanha é o país com o maior número de barragens construídas com BCC.

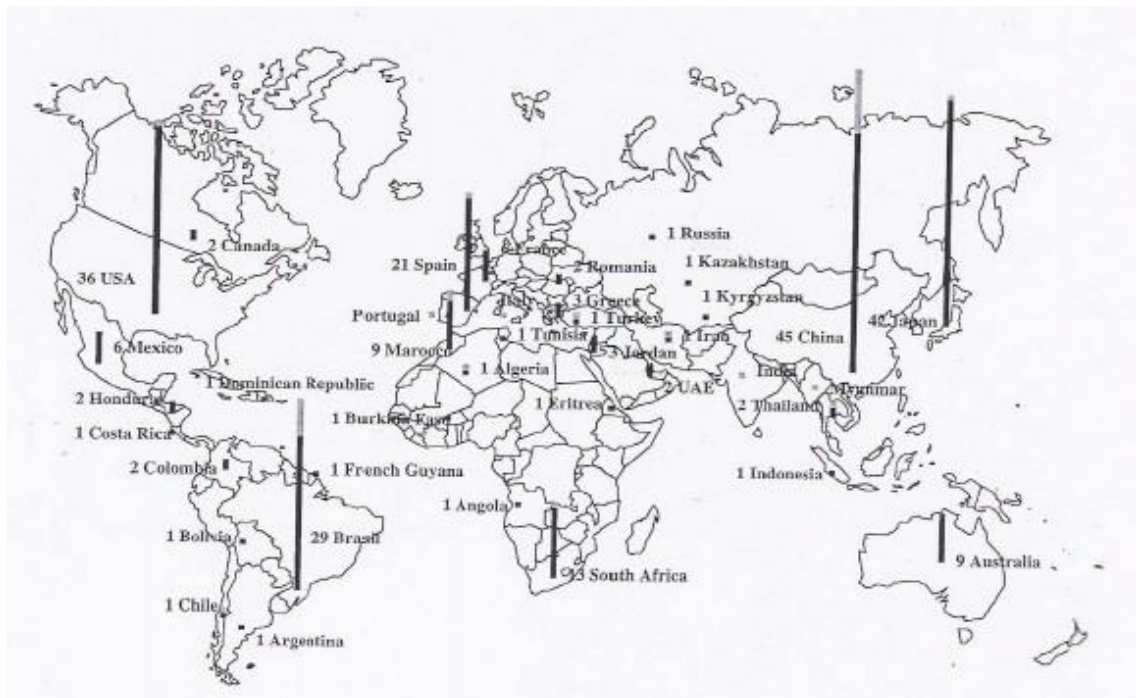


Figura 2.18 - Distribuição de barragens pelo mundo utilizando BCC (Dunstan, 2003).

A primeira barragem do mundo construída utilizando BCC foi a barragem de Shimajigawa (figura 2.19(a)) no Japão em 1981, no entanto, a primeira construída unicamente com BCC foi a barragem de Willow Creek (figura 2.19(b)) no estado de Oregon, EUA, em 1983. No caso de Portugal, o primeiro e único caso existente até ao momento é o da Barragem de Pedrógão (figura 2.20), situada no rio Guadiana a jusante do aproveitamento de Alqueva, finalizada em 2005.



Figura 2.19 - Barragem de Shimajigawa (a) e Willow Creek (b) (www.damengineer.com).



Figura 2.20 - Barragem de Pedrógão (PERI)

2.3.3 TIPOS DE ESCOAMENTO EM DESCARREGADORES EM DEGRAUS

Na dissipação de energia sobre descarregadores em degraus, dependendo do nível e do caudal que passa pelo descarregador, podem ocorrer diversos tipos de escoamento. Segundo Chanson (2003), o escoamento pode ser de três diferentes tipos: *nappe-flow*, *skimming-flow* e *transition-flow*, em que a sua tradução seria “escoamento em quedas sucessivas”, “escoamento deslizante sobre turbilhões” e “escoamento de transição”, respetivamente.

O *nappe-flow* (figura 2.21) é caracterizado por uma sucessão de quedas livres sucessivas do jato de água proveniente do degrau anterior cuja lâmina atinge total ou parcialmente o degrau imediatamente a jusante. Fenómeno normalmente observado em descarregadores com baixa inclinação ou caudais pouco significativos.

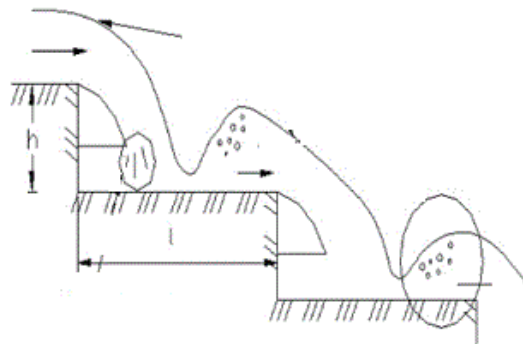


Figura 2.21 - Nappe flow (Chanson, 2003).

De acordo com Matos (1999) este fenómeno pode ser subdividido em três tipos de escoamento:

- Escoamento em quedas sucessivas com ocorrência de ressalto hidráulico na soleira do degrau (*isolated nappe flow with fully developed hydraulic jump*) (figura 2.22)
- Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato na soleira do degrau (*isolated nappe flow with partially developed hydraulic jump*) (figura 2.23)
- Escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jato na soleira do degrau (*partial nappe flow/ nappe interference flow*) (figura 2.24)

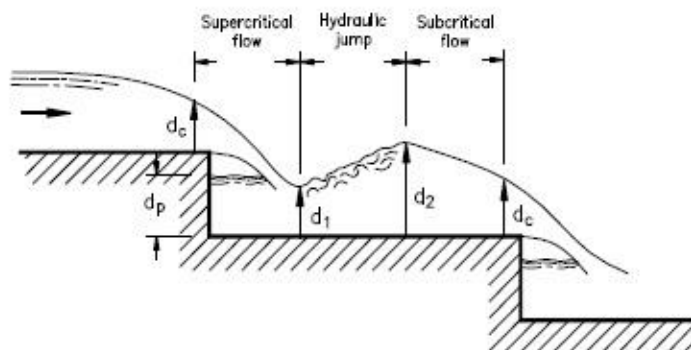


Figura 2.22 - Escoamento em quedas sucessivas com ocorrência de ressalto hidráulico na soleira do degrau (Meireles, 2011).

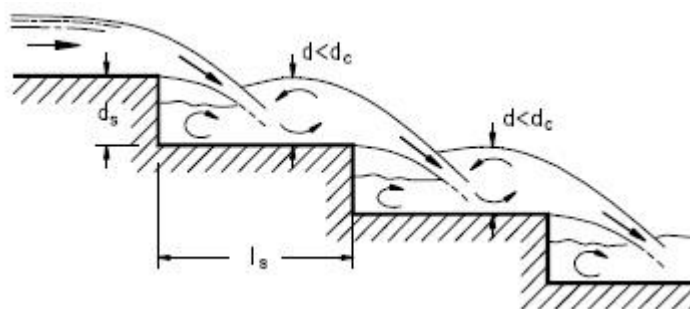


Figura 2.23 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto total do jato na soleira do degrau (Meireles, 2011).

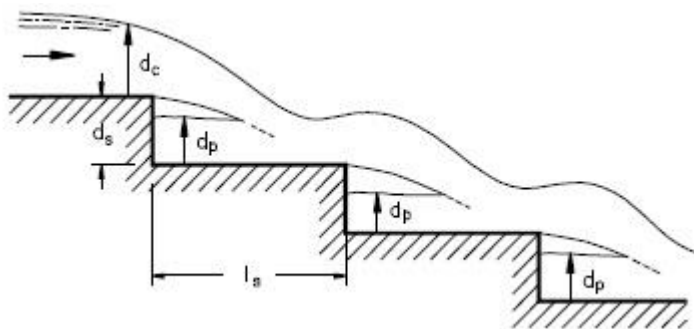


Figura 2.24 - Escoamento em quedas sucessivas com impacto parcial do jato na soleira do degrau (Meireles, 2011).

Chanson (2003) dá uma configuração diferente a este último tipo de escoamento, denominando-o de escoamento em quedas sucessivas sem ressalto hidráulico (*nappe flow without hydraulic jump*).

A energia pode ser dissipada de três diferentes formas: pelo atrito do jato com o ar; pelo impacto do jato sobre o degrau incidente ou ainda, caso ocorra, por ressalto hidráulico.

O *skimming flow* é caracterizado por um fluxo principal deslizando sobre os degraus e por um fluxo secundário que preenche o espaço formado pelos degraus, Chanson (2003). Assim como no escoamento referido anteriormente (*nappe flow*), este escoamento pode subdividir-se em três opções diferentes:

- Escoamento deslizando sobre turbilhões com preenchimento parcial da soleira do degrau pelo escoamento secundário (*wake-step interference*) (figura 2.25)
- Escoamento deslizando sobre turbilhões com preenchimento praticamente integral da soleira do degrau pelo escoamento secundário (*wake-wake interference*) (figura 2.26)
- Escoamento deslizando sobre turbilhões com recirculação estável do escoamento secundário (*recirculating cavity flow*) (figura 2.27)

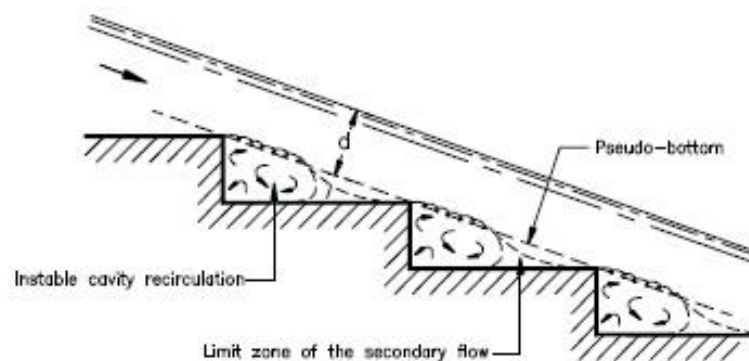


Figura 2.25 - Escoamento deslizando sobre turbilhões com preenchimento parcial da soleira do degrau pelo escoamento secundário (Meireles, 2011).

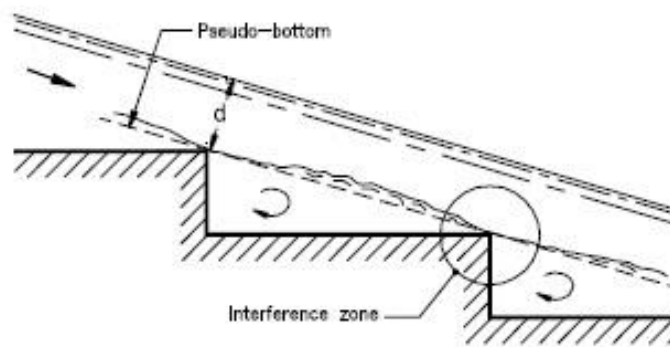


Figura 2.26 - Escoamento deslizando sobre turbilhões com preenchimento praticamente integral da soleira do degrau pelo escoamento secundário (Meireles, 2011).

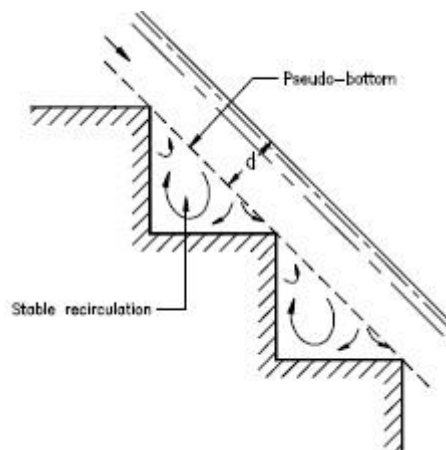


Figura 2.27 - Escoamento deslizante sobre turbilhões com recirculação estável do escoamento secundário (Meireles, 2011).

No escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*) a energia é principalmente dissipada nos remoinhos gerados nas cavidades formadas pelos degraus. Os remoinhos são mantidos devido às tensões de corte provenientes do fluxo (Morris 1955, Sorensen 1985 e Rajaratnam 1990).

O escoamento de transição ocorre entre os altos caudais do regime em quedas sucessivas (*napple flow*) e baixos caudais do regime deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), gerando um modo de transição entre os dois. Não existe um consenso entre os vários autores para determinar ao certo onde se iniciam e terminam estes dois escoamentos anteriormente referidos. Esta zona gerada pode ocasionar sério danos à estrutura.

2.3.4. EMULSIONAMENTO DE AR SOBRE O DESCARREGADOR EM DEGRAUS

Campbell *et al.* (1965) *apud* Sanagiotto (2003) referiu que nos escoamentos sobre descarregadores de perfil liso existe um ponto crítico onde a camada limite atinge a superfície livre denominado ponto de início de emulsão de ar. A superfície do escoamento a jusante deste ponto caracteriza-se pela sua irregularidade. Em descarregadores em degraus também ocorre o mesmo fenómeno, porém, conforme Bindo *et al.* (1993) a macrorugosidade dos degraus favorece o desenvolvimento da camada limite fazendo com que a sua espessura aumente muito mais rapidamente que em descarregadores de perfil liso.

No escoamento é possível distinguir quatro trechos distintos MATOS(1999): trecho de escoamento sem emulsão de ar; trecho de escoamento com emulsão de ar parcialmente desenvolvido; trecho de escoamento com emulsão de ar completamente desenvolvido; trecho de escoamento em regime uniforme (figura 2.28).

Através da figura 2.29 é facilmente visível que a superfície livre do escoamento é perfeitamente lisa num trecho inicial, a montante da denominada secção de afloramento da camada limite, e que a jusante dessa secção ocorre escoamento já com emulsão de ar.

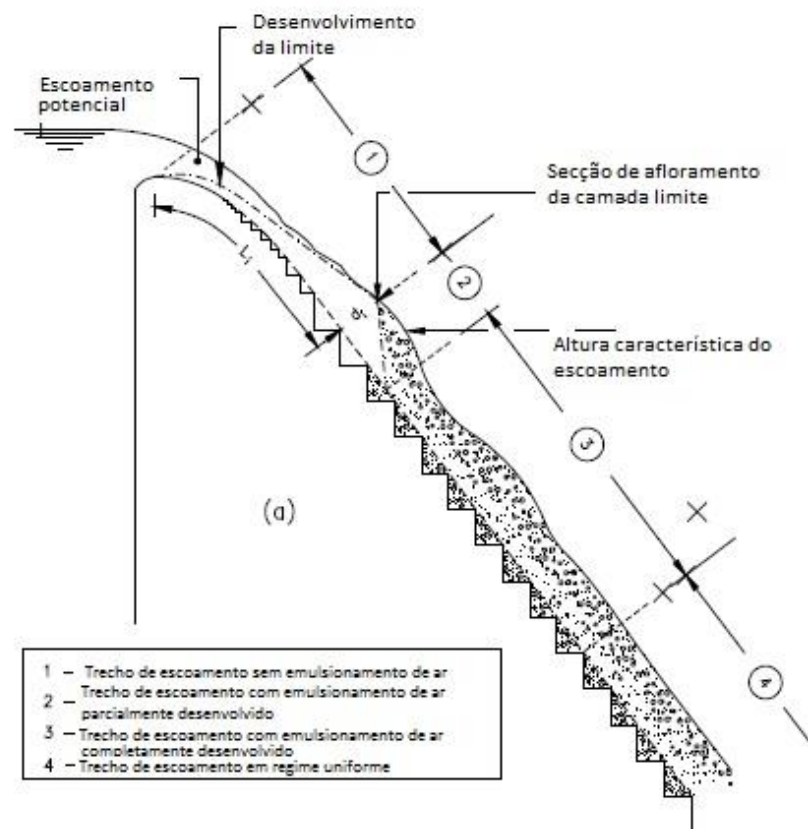


Figura 2.28 - Desenvolvimento do emulsãoamento de ar num descarregador de degraus (Meireles, 2011).



Figura 2.29 - Foto do desenvolvimento do emulsãoamento de ar.

Gangadharaiah *et al.* (1970) *apud* Dai Prá (2004) referiu que o início do emulsionamento ocorre quando a energia cinética do escoamento é superior aos efeitos da tensão superficial. Mas somente essa condição nem sempre é suficiente, é preciso que a camada limite esteja totalmente desenvolvida. O ponto de início de emulsionamento de ar define uma região de alta turbulência da camada limite, que nesse ponto atinge a superfície do escoamento. Através de medições experimentais em modelos de descarregadores em degress, diversos autores sugeriram equações para previsão de posições de início de emulsionamento e profundidade do escoamento nesse ponto. As equações propostas por alguns autores são apresentadas Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Equações sugeridas por diversos autores para posições de início de emulsionamento de ar e profundidade de escoamento nessa posição (adaptado de Conterato, 2014)

AUTOR	ANO	EQUAÇÕES PROPOSTAS	
Campbell <i>et al.</i> * e Tozzi <i>et al.</i> **	1965 e 1994	$\frac{\delta}{La} = 0,080 \left(\frac{La}{K} \right)^{-0,233}$	(1)
Wood <i>et al.</i>	1983	$\frac{La}{K} = 13,6(\sin \alpha)^{0,0796} \cdot F^{*0,713}$	(2)
Chanson	1994	$\frac{La}{K} = 9,8(\sin \alpha)^{0,08} \cdot F^{*0,71}$	(3)
		$\frac{ha}{K} = \frac{0,40}{(\sin \alpha)^{0,04}} \cdot F^{*0,64}$	(4)
Matos	1999	$\frac{La}{K} = 6,289 \cdot F^{*0,734}$	(5)
		$\frac{ha}{K} = 0,361 \cdot F^{*0,606}$	(6)
Sanagiotto	2003	$\frac{La}{K} = 9,7721 \cdot F^{*0,7014}$	(7)
		$\frac{ha}{K} = 0,3965 \cdot F^{*0,5975}$	(8)
Amador	2005	$\frac{La}{K} = 5,982 \cdot F^{*0,840}$	(9)
		$\frac{ha}{K} = 0,385 \cdot F^{*0,580}$	(10)
Conterato	2011	$\frac{La}{K} = 12 \cdot F^{*\left(\frac{2}{3}\right)}$	(11)
		$\frac{ha}{K} = \frac{1}{3} \cdot F^{*\left(\frac{2}{3}\right)}$	(12)

*para descarregadores com superfície lisa

**confirmou o uso para descarregadores em degress.

em que:

L_a representa a posição de início de emulsionamento de ar a partir da crista ou início da ogiva do descarregador (m);

h_a a altura da lâmina de água no ponto de início de emulsionamento de ar (m);

K a altura de rugosidade do degrau (m)

α a representa a inclinação do descarregador ($^\circ$);

δ a espessura da camada limite (m);

F^* o número de Froude do degrau, proposto por Wood *et al.* conforme Equação 13 (adimensional).

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot K^3 \cdot \sin(\alpha)}} \quad (13)$$

em que:

q representa a vazão específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$);

g a aceleração da gravidade (m/s^2);

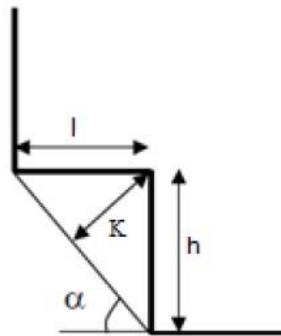


Figura 2.30 - Dimensões do degrau (Conterato, 2014).

Na figura 2.31 estão representados os resultados de diferentes estudos para o mesmo objetivo: determinar o ponto de início de emulsionamento de ar no escoamento. Os vários resultados foram adimensionalizados e Conterato (2011) ajustou uma linha de tendência concluindo que a utilização de degraus maiores antecipa o emulsionamento de ar no escoamento.

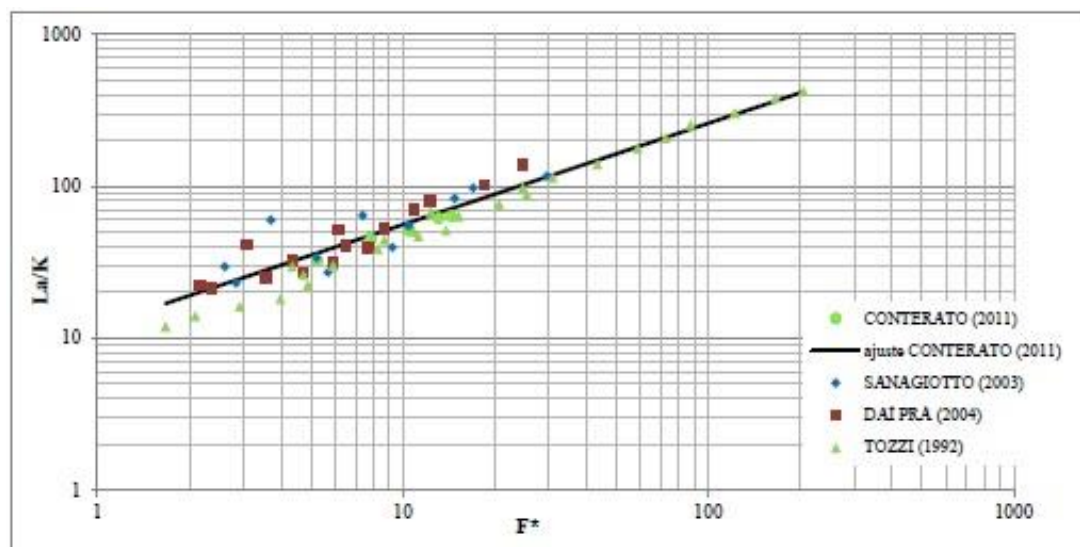


Figura 2.31 - Adimensionalização de resultados do ponto de início de emulsão de ar do escoamento (Conterato, 2011).

O mesmo se aplica na figura 2.32, onde no entanto é relacionada a altura da lâmina de água no ponto de início de emulsão de ar, adimensionalizada com o número de Froude.

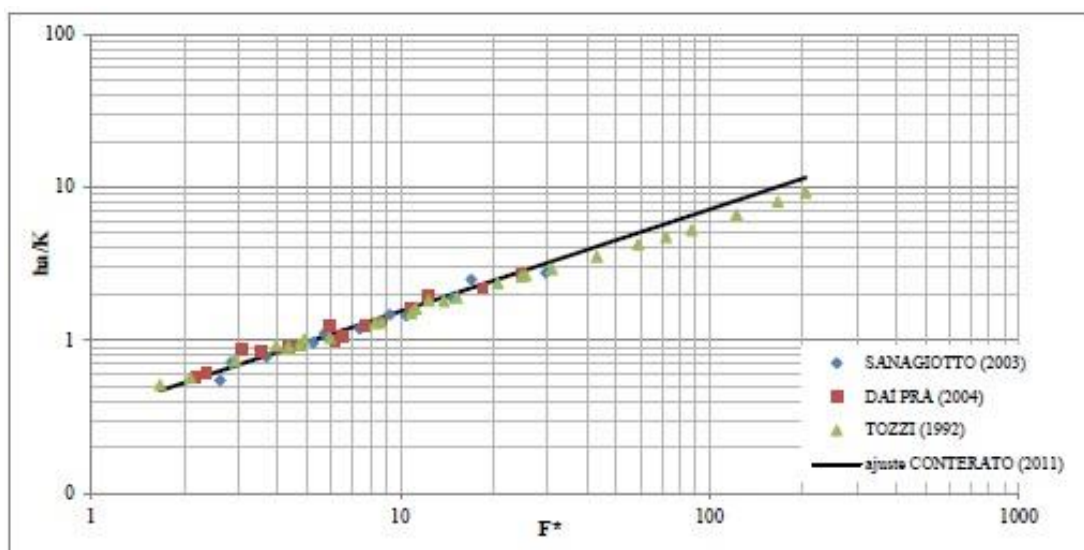


Figura 2.32 - Adimensionalizações para alturas do escoamento sobre o descarregador em degraus, conforme diferentes autores (Conterato, 2011).

2.3.5. DISSIPACÃO DE ENERGIA EM DESCARREGADORES DE DEGRAUS

Os descarregadores em degraus têm como principal função a dissipação de energia e é importante saber de que forma essa energia vai ser reduzida de maneira a serem projetadas bacias de dissipação o mais económicas possíveis para diminuir o risco de erosão do leito do rio.

Os principais fatores que interferem na dissipação de energia são:

- geometria dos degraus;
- inclinação do descarregador;
- tipo de escoamento;
- emulsão de ar no escoamento.

Foram realizados vários estudos para avaliar a perda de carga no escoamento sobre turbilhões, chegando-se a um consenso sobre os seguintes aspetos (Chanson, 1994):

- a perda de carga em descarregadores em degraus é superior comparativamente com um paramento convencional;
- num dado descarregador, a perda de carga, adimensionalizada pela energia específica do escoamento potencial na secção de jusante, diminui com o aumento do caudal;
- para determinado valor de caudal, a perda de carga adimensionalizada pela energia específica do escoamento potencial na secção de jusante do descarregador, é mais elevada em descarregadores de maior altura.

Várias investigações, como é o caso de Tozzi (1992), vieram demonstrar que a energia dissipada num descarregador em degraus é superior a um paramento convencional, como mostra a figura 2.33. Já na figura 2.34, são comparadas várias alturas de degraus, onde se conclui que para maiores alturas se obtém uma maior dissipação de energia, não se alcançando, todavia um aumento significativo.

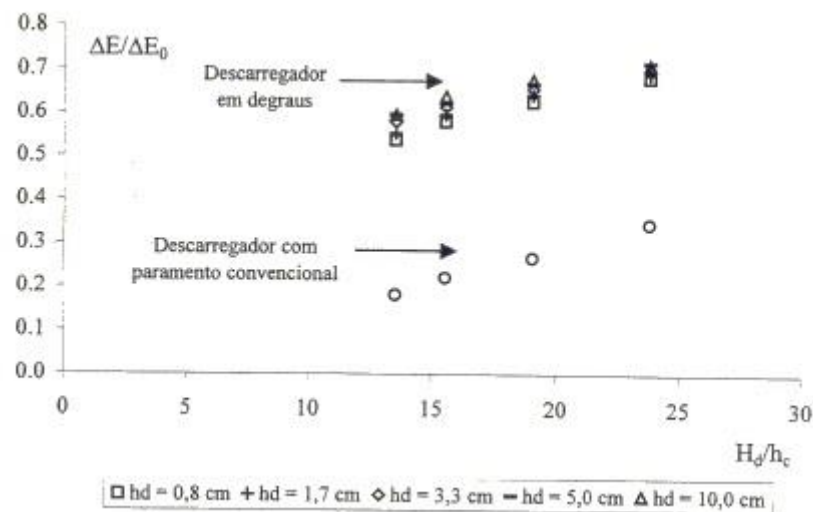


Figura 2.33- Comparação entre a perda de carga no escoamento no descarregador em degraus e no descarregador de paramento convencional (Tozzi, 1992)

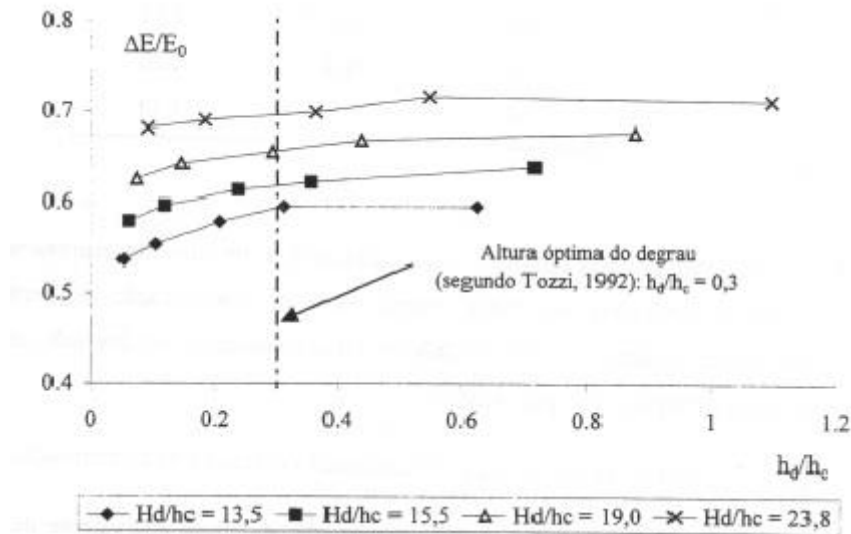


Figura 2.34 - Efeito da altura do degrau na perda de carga do escoamento (Tozzi, 1992)

Outro estudo realizado sobre a geometria dos degraus foi o de Sanagiotto (2003) que demonstrou que degraus maiores dissipam mais energia em descarregadores da mesma altura, o que confirma o que já tinha sido revelado por Tozzi (1992).

Sanagiotto (2003) utilizou a equação 14, proposta por Chow (1959) para canais de grande inclinação, para cálculo da energia em diferentes pontos ao longo do perfil do descarregador. Assim, através de Equação 15 calcula a energia dissipada em relação à energia de montante.

$$E_p = z_p + h_p \cos \alpha + \alpha 1 \frac{V_p^2}{2g} \quad (14)$$

$$\frac{\Delta E}{\Delta m} = \frac{E_m - E_p}{E_m} \quad (15)$$

em que:

ΔE representa a variação de energia;

E_p a energia em qualquer ponto ao longo do descarregador (m);

z_p a cota do piso do degrau considerado (m);

h_p a profundidade do escoamento medida perpendicularmente à quina do degrau (m);

V_p a velocidade média correspondente, calculada a partir de h_p (m/s);

E_m a energia a montante ($Y + 1,5H_c$) (m) e

α a inclinação do descarregador(°).

Na figura 2.35 estão demonstrados os resultados para a dissipação de energia em relação à energia a montante, para as diferentes alturas dos degraus, bem como os resultados de outros autores.

em que:

k representa a rugosidade do degrau (m);

h a profundidade não aerada do escoamento (m);

F* o número de Froude rugoso;

g a aceleração da gravidade (m/s^2);

α a inclinação do descarregador ($^\circ$);

fL a fator de resistência de descarregador de superfície lisa;

Dh a diâmetro hidráulico, corresponde a 4h, considerando canal retangular de grande largura (m);

L a distância medida a partir da crista do descarregador, paralelamente a este (m);

La a comprimento de aeração (m) e

q o caudal

2.4. BACIAS DE DISSIPAÇÃO POR RESSALTO HIDRÁULICO

A bacia de dissipação por ressalto hidráulico é uma estrutura que permite a dissipação de energia a jusante de um descarregador em degraus, onde ocorre a passagem do escoamento em regime rápido para um regime lento. As bacias de dissipação podem ter, ou não, elementos criteriosamente colocados para contribuir para essa perda de energia, no entanto, para grandes velocidades de escoamento deve haver o cuidado para evitar a erosão dos elementos eventualmente presentes.

O fenómeno de ressalto hidráulico origina grandes flutuações de pressão que, inevitavelmente, contribuirão para a erosão do leito do rio. Essas flutuações podem ser de tal maneira elevadas e bruscas que permitem o fenómeno de cavitação, caracterizado pela formação de bolhas de vapor devido à baixa pressão num determinado local e que depois acabarão por rebentar, colaborando assim para o desgaste da bacia de dissipação.

2.4.1. FORMAS DE RESSALTO HIDRÁULICO

Segundo Peterka (1957), o ressalto hidráulico pode ocorrer, pelo menos, de quatro maneiras distintas. Todas essas formas são encontradas na prática, e o que distingue cada uma delas é a maneira como se dá o ressalto e a energia que é dissipada neste fenómeno. Alguns ressaltos hidráulicos podem ter um efeito desejável e outros um efeito indesejável e podem ser caracterizados pelo seu número de Froude. Na figura 2.36 estão apresentadas as várias formas de ocorrência do ressalto hidráulico.

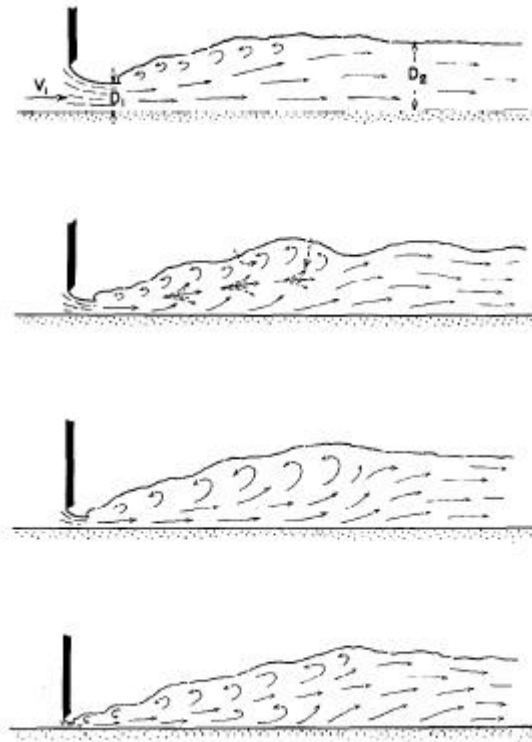


Figura 2.336 - Diversas formas de ressalto hidráulico (Peterka, 1957).

Os ressaltos são classificados da seguinte forma:

- Pré-ressalto (número de Froude entre 1,7 e 2,5): é formada uma ondulação acompanhada de rolos que tendem a aumentar à medida que esse número se aproxima de 2,5. Neste caso, não existe a necessidade de ter uma bacia de dissipação especial já que o escoamento é praticamente uniforme com velocidade aproximadamente constante e onde a perda de energia é menor que 20%;
- Ressalto de transição (número de Froude entre 2,5 e 4,5): é usualmente encontrado em estruturas de baixa queda, são geradas ondas de período bastante irregular que se propagam para além da bacia de dissipação por vários quilómetros causando a erosão do leito;
- Ressalto estabilizado (número de Froude entre 4,5 e 9): é um ressalto bem definido, que não se propaga tanto como o anterior, mantendo a turbulência dentro dele, o que faz que não haja tanta turbulência a jusante da bacia de dissipação. Este caso dissipa entre 45 a 70% da energia do escoamento;
- Ressalto forte (número de Froude superior a 9): à medida que o número de Froude aumenta, a altura conjugada associada ao regime rápido diminui e a velocidade correspondente a esta altura aumenta cada vez mais, chegando a formar ondas a jusante da bacia de dissipação. Neste ressalto pode dissipar-se até 85% da energia.

Os valores atribuídos aos ressaltos acima descritos não são absolutos, isto é, pode haver pequenas oscilações destes números, associados a vários fatores locais onde ocorra o ressalto.

2.4.2 ALTURAS CONJUGADAS

As alturas conjugadas associadas ao regime rápido e lento correspondem à altura verificada a montante e jusante, respetivamente, do fenómeno de ressalto hidráulico como indica a figura 2.37.

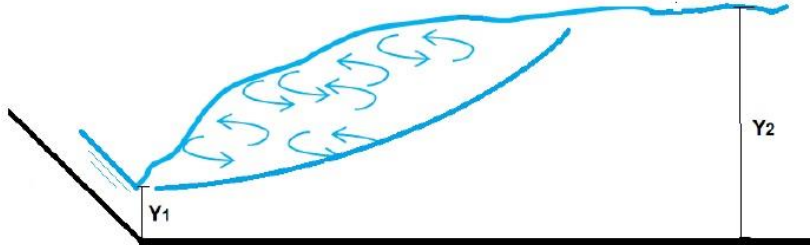


Figura 2.347 - Alturas conjugadas (Conterato, 2014).

Os primeiros estudos teóricos e práticos foram realizados por Bidone (1820) e Bélanger (1828), tendo este último realizado uma abordagem analítica e chegar a uma fórmula que relaciona as duas alturas, ou seja

$$\frac{Y_2}{Y_1} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1 \right), \text{ em que } F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gY_1}} \quad (23)$$

em que:

Y_1 representa a altura conjugada associada ao regime rápido (m);

Y_2 a altura conjugada associada ao regime lento (m) e

F_{r1} o número de Froude correspondente à altura conjugada associada ao regime lento.

Depois desta equação surgiram outros estudos com o mesmo intuito de relacionar as alturas conjugadas, como Silvester (1964), Rajaratnam (1967), Leutheuser e Kartha (1972), Hager (1988) e Ohtsu e Yasuda (1994), tendo estes dois últimos um papel de destaque, propondo as equações 24 e 25, respetivamente.

$$\frac{T_w}{Y_1 \cos(\theta)} = 23,5 \left(1 + \frac{3}{2} \cdot E \right)^{-2} + \frac{\sqrt{2}(F_{r1}-3)}{\tanh\left(\frac{5}{2}E\right)}, \text{ onde } E = \frac{T_w - Z_1}{T_w} \quad (24)$$

$$\left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^3 - \{2 \cdot F_{r1}^2 + 1 - S_f\} \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + 2 \cdot F_{r1}^2 = 0, \text{ onde } S_f = 0,12(F_{r1} - 1)^2 \quad (25)$$

em que:

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

θ representa a inclinação do canal a montante do trecho plano sobre o qual ocorre a formação do ressalto hidráulico;

Z_1 o desnível entre a cota da estrutura de descarga onde se identifica o início do ressalto hidráulico e a cota de fundo da bacia de dissipação e

2.4.3. COMPRIMENTO DO RESSALTO

Define-se comprimento de ressalto hidráulico como a distância longitudinal desde a transição do escoamento em regime rápido para regime lento. O estabelecimento desse comprimento é essencial para a definição do comprimento da bacia de dissipação, já que quanto mais preciso for esse conhecimento, maior será a poupança na sua construção.

Foram vários os autores que estudaram o comprimento do ressalto hidráulico e de maneira a quantificá-lo seria necessário fazer uma análise ao seu início e fim. De uma maneira geral, os vários autores identificavam facilmente a posição do início do ressalto, pela observação da mudança brusca da linha média de água. Contudo, o mesmo não sucede para a escolha do final do ressalto, surgindo diversas interpretações. Elevatorski (1959) afirma ser a posição em que não há grande variação da superfície livre, sendo essencialmente horizontal; para Rajaratnam (1967), a partir de uma proposta analítica, o final do ressalto é quando a altura de água encontra a altura conjugada associada ao regime lento; já para Marques *et al.* (1997), o ressalto termina quando já não se verificam perturbações na bacia de dissipação provocadas pelas flutuações de pressão.

Na tabela 2.3 surgem algumas das equações propostas por vários autores para definir o comprimento do ressalto hidráulico, L_j .

Tabela 2.3 - Equações sugeridas por diversos autores para determinação do comprimento do ressalto.

AUTOR	ANO	Equações propostas	
Riegel, Beebe	1917	$L_j = 5(Y_2 - Y_1)$	(26)
Aravin	1935	$L_j = 5,4(Y_2 - Y_1)$	(27)
Peterka	1957	$L_j = 6,1(Y_2 - Y_1)$ $4,5 \leq F_{r1} \leq 9$	(28)
Elevatorski	1959	$L_j = 6,9(Y_2 - Y_1)$	(29)
Marques <i>et al.</i>	1997	$L_j = 8,5(Y_2 - Y_1)$	(30)
Teixeira	2003	$L_j = 8(Y_2 - Y_1)$	(31)

2.4.4 COMPRIMENTO DO ROLO

Como foi logo mostrado no início do capítulo, a figura 2.1 apresenta um ressalto hidráulico, onde está definido o comprimento do ressalto (L_j) e o comprimento do rolo (L_r).

Tal como na distância do ressalto, também na definição do tamanho do rolo existe uma certa subjetividade tome-se como exemplo Rajaratnam (1967) que defende que o rolo termina quando a água atinge 95% da altura conjugada lenta. Por outro lado Marques et al (1997) determinou esse comprimento através da análise de pressões instantâneas junto do fundo da bacia de dissipação, atribuindo o final do rolo à posição onde se registasse o mínimo valor do coeficiente de assimetria das amostras.

Não sendo estes os únicos estudos existentes, a tabela 2.4 apresenta algumas das equações propostas por vários autores.

Tabela 2.4 - Equações sugeridas para o comprimento do rolo (Teixeira, 2003).

AUTOR	ANO	Equações propostas	
Safranez	1929	$\left(\frac{L_r}{Y_1}\right) = 6F_{r1}$	(32)
Pietrkowski	1932	$\left(\frac{L_r}{Y_1}\right) = 5,9F_{r1}$	(33)
Einwacather	1933	$L_r = \left(15,2 - \frac{0,24Y_2}{Y_1}\right) \cdot \left\{\frac{Y_2}{Y_1} - 1 - v_1 \cdot \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) - 1\right\}$	(34)
Douma	1942	$L_r = 3Y_2$	(35)
Peterka	1957	$L_r = 4,5Y_2$	(36)
Newmham	1973	$L_r = 6,73 \cdot (F_1 - 1)$	(37)
Hager et al.	1989	$L_r = 12 + 100 \cdot \tanh\left(\frac{F_{r1}}{12,5}\right)$	(38)
Marques et al	1997	$L_r = 6 \cdot (Y_2 - Y_1)$	(39)

2.4.5. RESSALTO A JUSANTE DE DESCARREGADORES EM DEGRAUS

O ressalto a jusante de um descarregador e de planos inclinados pode apresentar diversas formas. Hager (1988) propôs uma classificação para distinguir os vários tipos de ressalto existentes, indicados na figura 2.38.

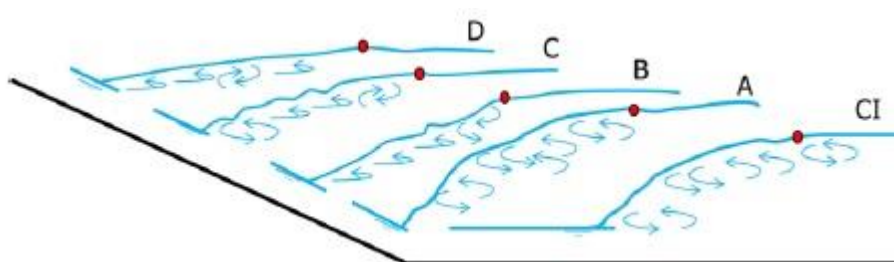


Figura 2.38 - Perfis de ressalto hidráulico a jusante de descarregadores e/ou plano inclinado (Vischer e Hager, 1995).

Caso a altura de água a jusante do ressalto aumente e seja maior que a altura conjugada associada ao regime lento do ressalto, este sofre um afogamento, deslocando-se para o plano inclinado. Hager (1988) apresenta a seguinte classificação:

- Tipo A: forma-se quando a altura conjugada associada ao regime lento é igual à lâmina de água na bacia, de forma a que o ressalto ocorre completamente no canal a jusante do descarregador;
- Tipo B: ocorre quando o ressalto tem o início no descarregador, no entanto, grande parte deste encontra-se na bacia de dissipação;
- Tipo C: caracteriza-se pelo final do ressalto se encontrar no início da bacia de dissipação;
- Tipo D: o ressalto ocorre na totalidade sobre o descarregador;
- Tipo CI: o ressalto é formado totalmente na bacia de dissipação, porém a uma distância do descarregador superior à do tipo A. Este fenómeno ocorre devido ao fato de altura da lâmina de água ser inferior à altura conjugada associada ao regime lento correspondente ao ressalto do tipo A.

2.4.6. RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE E SUBMERSO

As condições do escoamento a jusante do descarregador afetam a formação do ressalto, podendo ocorrer a submergência do mesmo. Este fenómeno surge quando a altura da lâmina de água sobre a bacia de dissipação (T_w) é maior que a altura conjugada associada ao regime lento (Y_2). Por outro lado, quando T_w e Y_2 se igualam considera-se que estamos perante um ressalto livre. A figura 2.39 evidencia estes dois tipos de ressalto.

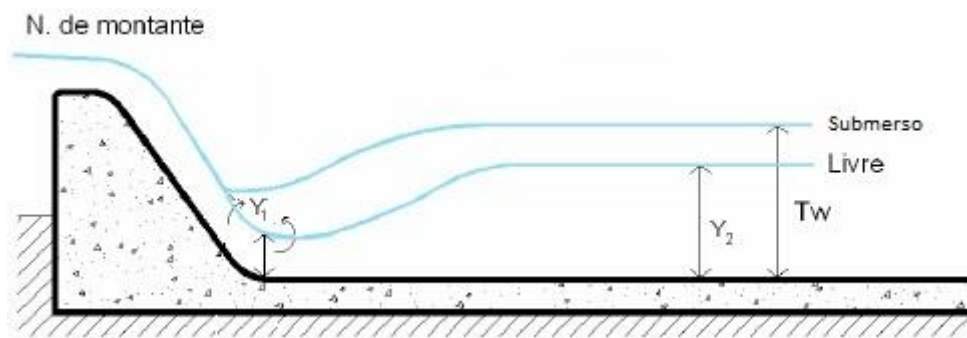


Figura 2.359 - Ressalto hidráulico livre e submerso formados a jusante de um descarregador (Teixeira, 2008).

O ressalto afogado (submerso) varia consoante o grau de submergência, que é dado pelo seguinte equação:

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad (40)$$

em que:

S representa o grau de submergência;

T_w a altura da lâmina de água sobre a bacia de dissipação (m) e

Y_2 altura conjugada associada ao regime lento.

A submergência acaba por ter influência na forma do ressalto e consequentemente nas pressões que são exercidas sobre a bacia de dissipação. Mees (2008) refere de que maneira é que a submergência pode fazer variar o campo de pressões:

- Para um mesmo caudal específico, o valor da pressão média sobre a bacia de dissipação será maior quanto maior for a submergência;
- Para um mesmo caudal específico, o valor do desvio padrão será menor quanto maior for a submergência.

Neste campo, Rajaratnam (1967) também evidencia influências da submergência no comprimento do ressalto e na dissipação de energia:

- Para um mesmo número de Froude de escoamento, o comprimento do ressalto será maior quanto maior for a submergência;
- A eficiência na dissipação de energia atinge um máximo para ressaltos levemente afogados e diminui após este pico para ressaltos muito afogados.

2.4.7. BACIAS DE DISSIPACÃO TIPO I

As bacias de dissipação tipo I, sem qualquer tipo de elementos, como mostra a figura 2.2, são o tipo de bacias mais utilizadas para o estudo do ressalto hidráulico, já que este ocorre numa forma livre, sem existir nenhum tipo de interferência por parte de soleiras terminais, blocos de impacto ou blocos de queda. Desta forma, foram surgindo diversos estudos sobre como se desenvolve o ressalto hidráulico neste tipo de bacias ou como este influencia a distribuição de pressões ao longo da bacia.

A compreensão de como se desenvolve o ressalto hidráulico e de que forma é que os esforços atuam sobre a bacia é fundamental para o dimensionamento desta. Marques *et al.* (1996) apresentaram resultados de pressões médias e flutuações de pressão em função da posição do ressalto hidráulico, segundo as seguintes equações:

$$\frac{P-Y_1}{Y_2-Y_1} = F\left(\frac{x}{Y_2-Y_1}\right) \quad (41)$$

$$\left(\frac{\sigma}{H_t}\right) \cdot \left(\frac{Y_2}{Y_1}\right) = F\left(\frac{x}{Y_2-Y_1}\right) \quad (42)$$

em que:

P representa a Pressão média (m.c.a);

σ o Desvio padrão (m);

Y_1 a Altura conjugada associada ao regime rápido no início do ressalto, para $S=1$ (m);

Y_2 a Altura conjugada associada ao regime lento no final do ressalto, para $S=1$ (m);

x a Distância a partir do pé do descarregador (início do ressalto) (m);

H_t a Perda de carga ao longo do ressalto (m) e

F a Função de ajuste.

As figuras 2.40 e 2.41 apresentam, respetivamente, os resultados obtidos das pressões médias adimensionalizadas e as flutuações de pressões adimensionalizadas, obtidas no estudo de Marques *et al.* (1996).

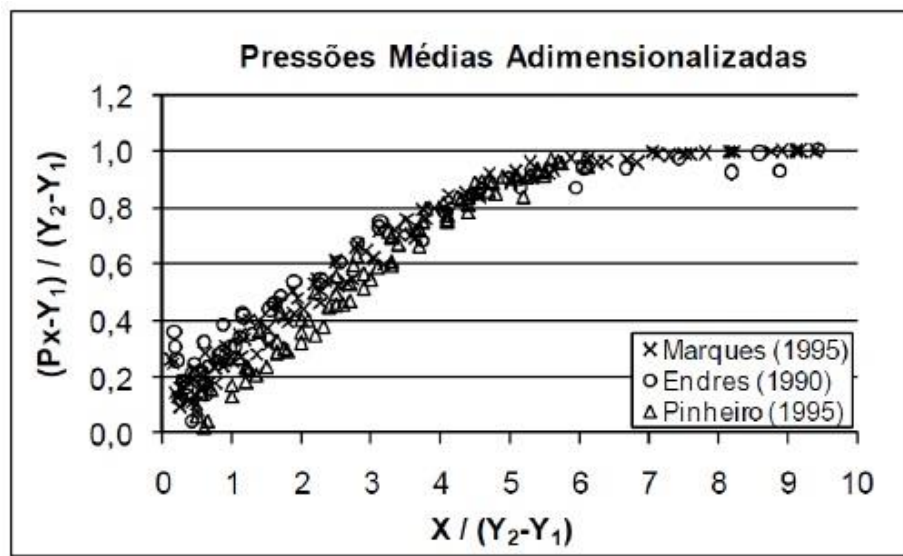


Figura 2.4036 - Pressões médias adimensionalizadas (Marques et al, 1996).

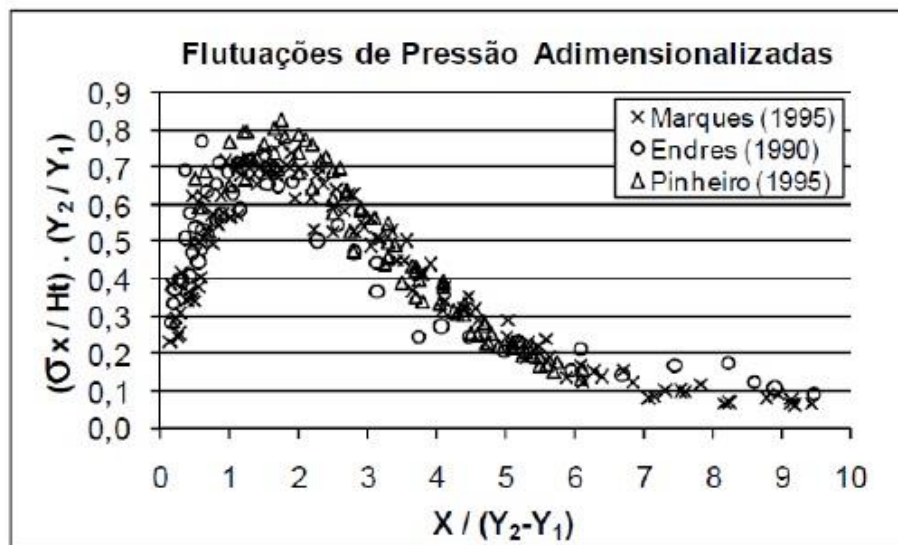


Figura 2.41 - Flutuações de pressões médias adimensionalizadas (Maques et al, 1996).

Após a análise dos resultados, os autores concluíram no que respeita à caracterização e posicionamento do ressalto, o seguinte:

- Ponto de máxima flutuação: $1,75 (Y_2 - Y_1)$;
- Descolamento do escoamento junto o fundo: $4,0 (Y_2 - Y_1)$;
- Final do rolo: $6,0 (Y_2 - Y_1)$;
- Final do ressalto: $8,5 (Y_2 - Y_1)$.

Posteriormente, Teixeira (2008) concluiu que o comprimento do ressalto seria a cerca de $8 (Y_2 - Y_1)$, como se verificou na tabela 2.3.

3

INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Para a realização deste estudo foi utilizado um modelo físico de um descarregador em degraus a que se segue uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico a jusante, existente no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH/UFRGS) em Porto Alegre, Brasil.

3.1. DESCRIÇÃO DO MODELO

As soleiras terminais na bacia de dissipação foram ajustadas consoante as necessidades do estudo. O modelo apresenta as seguintes características:

- Altura do descarregador (H) = 2,45m;
- Inclinação do descarregador = 1(V) : 0,75(H);
- Descarregador constituído por 33 degraus de 0,06m de altura;
- Comprimento do canal a jusante do descarregador = 5m,
- Largura do canal = 0,40m.

As figuras 3.1 e 3.2 mostram o canal hidráulico utilizado e um esquema do mesmo, respetivamente. Como se pode verificar pelo esquema, a montante do descarregador há um pequeno reservatório para que ocorra a estabilização do escoamento. Uma das paredes laterais do canal é revestida de acrílico de modo a poder visualizar-se o comportamento do escoamento. A jusante do canal existe uma comporta que permite controlar o nível e um piezómetro para fazer as respetivas leituras. A figura 3.3 representa um esquema do descarregador com o detalhe, indicando as dimensões de cada um dos 33 degraus e também uma foto do escoamento sobre o descarregador.



Figura 3.1 - Canal hidráulico.

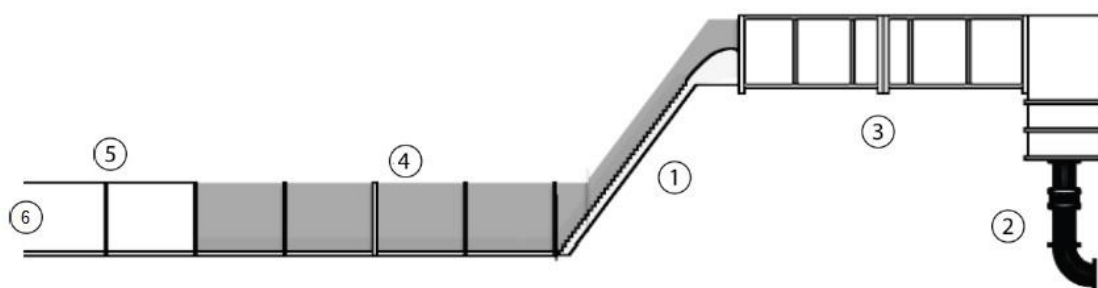


Figura 3.2 - Esquema do canal hidráulico utilizado (Conterato, 2014).

em que:

1. Descarregador em degraus;
2. Sistema de alimentação;
3. Reservatório a montante;
4. Canal a jusante com visualização (5 m, altura 1 m);
5. Canal a jusante sem visualização (3m, altura 1 m);
6. Comporta de controlo de nível para canal de retorno.

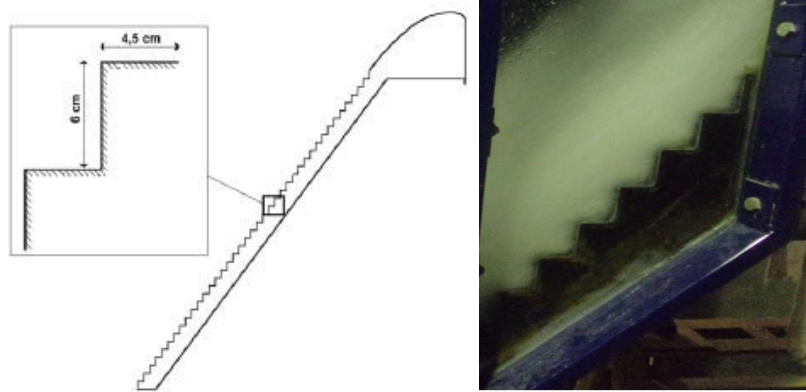


Figura 3.3 - Esquema do descarregador e detalhes dos degraus.

3.2. CRITÉRIO DE SEMELHANÇA PARA TRANSPOSIÇÃO DOS RESULTADOS DO MODELO

O critério de semelhança adotado para estabelecer a relação entre o modelo e o protótipo foi o critério de semelhança de Froude, obedecendo à relação entre forças de inércia e gravidade. Conterato (2014) sugere a utilização de uma escala inferior a 10, em função dos efeitos de escala, devido ao emulsionamento de ar nos degraus do descarregador. As seguintes equações estabelecem as relações entre modelo e protótipo para velocidade, vazão e vazão específica:

$$\frac{V_m}{V_p} = \lambda^{1/2} \quad (43)$$

$$\frac{Q_m}{Q_p} = \lambda^{5/2} \quad (44)$$

$$\frac{q_m}{q_p} = \lambda^{3/2} \quad (45)$$

em que:

V_m representa a Velocidade do escoamento no modelo (m/s);

V_p a Velocidade do escoamento no protótipo (m/s);

Q_m o Caudal no modelo (m³/s);

Q_p o Caudal no protótipo (m³/s);

q_m o Caudal específico no modelo (m²/s);

q_p o Caudal específico no protótipo (m²/s);

λ a Razão entre as escalas geométricas de modelo e protótipo.

3.3. SOLEIRAS UTILIZADAS

Como já foi referido, este estudo dá continuidade ao que foi realizado por Conterato (2014). Nessa investigação, a autora utilizou as soleiras representadas na figura 3.4, onde se encontram as soleiras de inclinação 1:1 com as alturas de 24, 18, 12 e 10 cm. Já na figura 3.5 estão apresentadas as soleiras utilizadas neste estudo, todas elas com 6 cm de altura, porém com inclinações de 1:1 e 1:3.

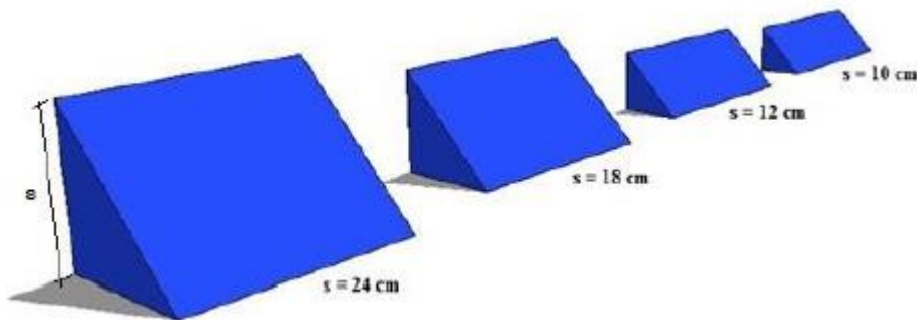


Figura 3.4 - Soleiras utilizadas por Conterato (2014).

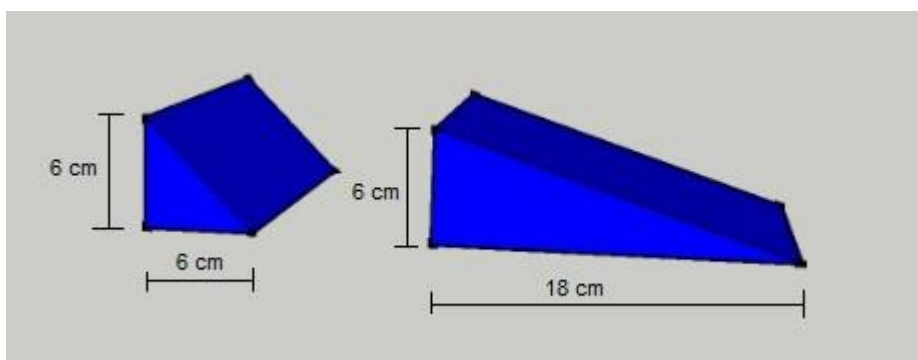


Figura 3.5 - Soleiras utilizadas no presente estudo 1(V):1(H) e 1(V):3(H).

3.3. EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO

As principais medições efetuadas foram os caudais e as alturas a jusante do ressalto hidráulico. No que toca aos caudais recorreu-se a um medidor eletromagnético posicionado na tubagem a montante do descarregador, que possibilitava obter o caudal instantâneo para os diversos ensaios realizados. Em relação às alturas a jusante, os seus valores foram registados a partir de um piezómetro colocado no final do canal. Estes dois equipamentos de medição estão representados na figura 3.6.



Figura 3.6 – Dispositivo de medição de caudal e piezómetro

3.4. AQUISIÇÃO DE DADOS

Os equipamentos de medição de pressão foram ligados a um sistema de aquisição de dados, representado na figura 3.7, uma placa da National Instruments NI USB-6225. Esses dados são enviados para um computador, onde são registados através do software LabView, que posteriormente exportará esses dados para um ficheiro Excel de forma a serem analisados. Cada ensaio tinha a duração de oito minutos, com uma frequência de 256 Hz, o que significa que para cada ensaio foram recolhidos 122880 dados de pressão por cada transdutor. Existindo na totalidade 24 transdutores espalhados pela bacia de dissipação, sendo testados 5 caudais para as 3 posições de cada uma das 2 soleiras, tudo isto somado perfaz um total de cerca de 90 milhões de dados recolhidos em todo o processo de investigação.



Figura 3.7 - Placa de aquisição utilizada

3.4.1. AQUISIÇÃO DE DADOS NA BACIA DE DISSIPACÃO

As pressões instantâneas ao longo da bacia de dissipação foram adquiridas através de transdutores piezoresistivos da marca Sitron, modelo SP96 com precisão de $\pm 0,5\%$, com uma faixa de aquisição

de -0,5 a 1,5 m.c.a. A ficha técnica deste transdutor e a sua disposição na bacia de dissipação encontram-se evidenciados nas figuras 3.8 e 3.9, respetivamente.



SP96

Medição de Pressão para Líquidos e Gases

Alimentação: 12...30Vdc
Consumo: 22mA máx.
Saída: 4...20mA (2 fios)
Precisão: $\pm 0,5\%$ / $< 1\%$ (máx.)
Tipo de Sensor: Piezoresistivo em Aço Inox 316
Con. Elétrica: Prensa Cabo 1/2" ou Conector M12
Conexão: 1/4" a 1 1/2" BSP ou NPT, flange ou sanitária
Partes Molhadas: Aço Inox 316
Sobre Pressão: 3 x F.E
Temp. Operação: -10°C a $+80^{\circ}\text{C}$
Classe Proteção: IP 65

Figura 3.8 - Ficha técnica dos transdutores utilizados.

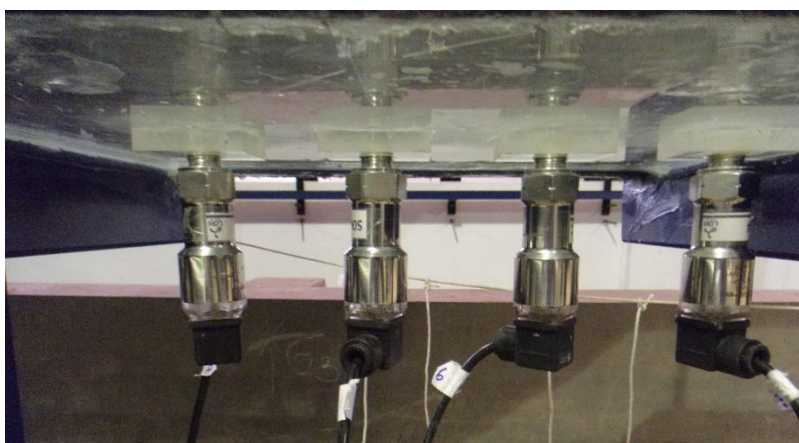


Figura 3.9 - Disposição de alguns transdutores na bacia de dissipação

Com a finalidade de obter resultados fiáveis e garantir o bom funcionamento destes equipamentos, antes de se proceder à aquisição de dados para o estudo, foi realizada uma calibração dos mesmos em loco.

A figura 3.10 é um exemplo dessa curva de calibração de um dos transdutores.

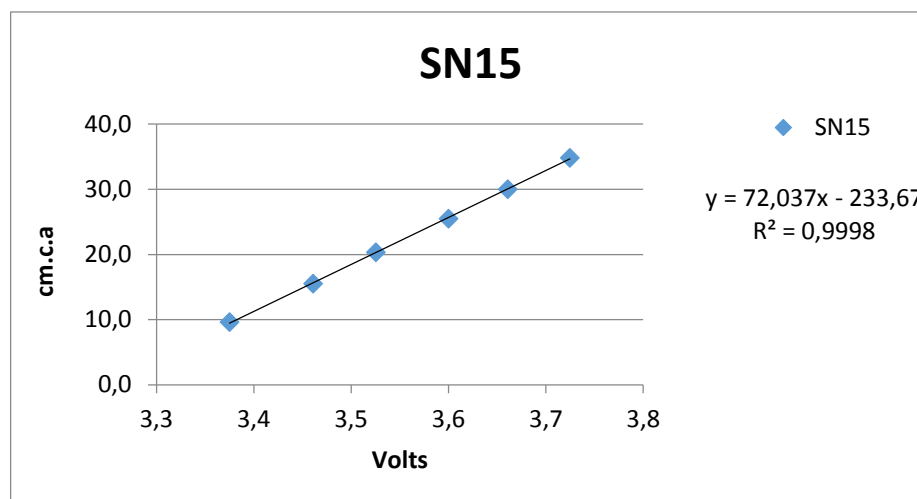


Figura 3.10 - Exemplo de curva de calibração

Foram instalados 24 destes transdutores ao longo da bacia de dissipação, a tabela 3.1 indica a distância entre cada um dos transdutores e a distância acumulada desde o início da bacia. A figura 3.11 apresenta um esquema desse mesmo posicionamento.

Tabela 3. 1 - Distâncias entre cada transdutor e distância acumulada a partir do início da bacia de dissipação.

Transdutores	Distâncias (m)	Distância acumulada (m)
1	0,150	0,150
2	0,100	0,250
3	0,100	0,350
4	0,100	0,450
5	0,160	0,610
6	0,100	0,710
7	0,100	0,810
8	0,100	0,910
9	0,200	1,110
10	0,100	1,210
11	0,150	1,360
12	0,090	1,450
13	0,160	1,610
14	0,150	1,760
15	0,150	1,910
16	0,150	2,060
17	0,150	2,210
18	0,140	2,350
19	0,250	2,600
20	0,150	2,750
21	0,145	2,895
22	0,155	3,050
23	0,300	3,350
24	0,995	4,345

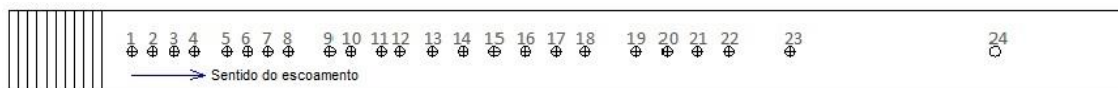


Figura 3.11 - Esquema do posicionamento dos transdutores na bacia de dissipação (Conterato, 2014)

3.5. CONSIDERAÇÕES GERAIS DO ENSAIO

Como já foi referido anteriormente, este estudo é uma continuação de um trabalho realizado por Conterato (2014), que utilizou quatro soleiras terminais de alturas diferentes (10, 12, 18 e 24 cm) com a mesma inclinação de 1:1, dispostas em três posições diferentes ao longo da bacia de dissipação. Já esta investigação consiste em utilizar uma soleira terminal de 6 cm com duas inclinações diferentes (1:1 e 1:3). De modo a ter alguma segurança no que se refere à coerência entre os resultados dos dois estudos, repetiram-se os ensaios da soleira de 10cm, tendo estes apresentado valores praticamente idênticos aos anteriormente registados, o que vem mostrar a repetibilidade dos ensaios.

As três posições referidas são a 245; 163 e 122,5 cm do final do descarregador que correspondem a $1H$, $2/3H$ e $1/2H$, respetivamente, em que H representa a altura do descarregador, ou seja, 2,45 m. A figura 3.12 representa um esquema do descarregador e da bacia de dissipação com as soleiras posicionadas nessas três posições e ensaiadas separadamente.

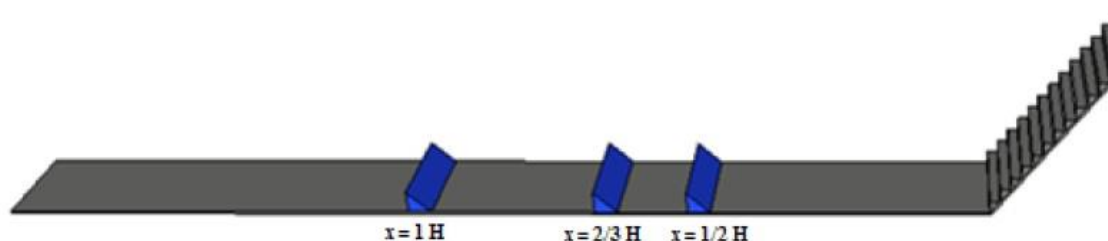


Figura 3.12 - Esquema mostrando as três diferentes posições dentro da bacia de dissipação (Conterato, 2014)

Nos ensaios foram utilizados cinco caudais: 40; 60; 80; 100 e 110L/s o que corresponde a um caudal específico de 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,275 m²/s (largura da bacia de dissipação igual a 40 cm). Com a ajuda das comportas a jusante ajustou-se a altura lenta (Y_2), previamente estabelecida, para cada uma das vazões. Estes valores de nível de jusante foram os equivalentes às alturas lentas para cada vazão numa bacia tipo I, medidos em ensaios neste modelo, de maneira a que o ressalto se iniciasse no final do descarregador, ou seja, no início da bacia. A escolha dos caudais tem que ver com o fato de o caudal mínimo lido pelo medidor utilizado ser de aproximadamente 40L/s e caso se utilizasse caudais muito superiores a 110L/s poder-se-ia estar perante uma situação de extravasamento de água do canal.

A tabela 3.2 mostra as características de cada uma das condições de ensaio (altura, velocidade e número de Froude) para montante e jusante.

Tabela 3 2 - Características dos ensaios com descarregadores em degraus.

Caudal (L/s)	Jusante			Montante		
	Y ₂ (m)	V ₂ (m/s)	Fr ₂	Y ₁ (m)	V ₁ (m/s)	Fr ₁
40	0,265	0,377	0,234	0,026	3,788	7,44
60	0,339	0,442	0,243	0,036	4,155	6,98
80	0,409	0,489	0,244	0,044	4,545	6,91
100	0,459	0,545	0,257	0,054	4,621	6,34
110	0,478	0,575	0,266	0,060	4,586	5,98

A altura conjugada associada ao regime rápido (Y_1) foi determinada a partir da equação de Bélanger (23), adotando-se como altura conjugada associada ao regime lento (Y_2), a altura de água a jusante onde não apresentava mais influência do ressalto. Esta altura, (Y_2), foi medida no modelo de maneira a que o ressalto se posicionasse no final do descarregador. Comparando-se os números de Froude obtidos a jusante de um descarregador em degraus com o número de Froude a jusante de um descarregador de perfil liso (descarregador convencional) verificou-se uma redução significativa deste número para o escoamento a jusante do descarregador em degraus, isto ocorre devido à dissipação de energia ao longo do perfil do descarregador que pode atingir os 80% em alguns casos.

4

ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. ANÁLISE DE RESULTADOS DE PRESSÕES MÉDIAS EM BACIA COM SOLEIRA TERMINAL COM INCLINAÇÃO 1:1

4.1.1. COMPARAÇÃO DE ESTUDOS

De forma a haver coerência com o estudo de Conterato (2014), antes de se proceder aos ensaios deste trabalho, isto é, testar uma soleira de menor altura das anteriormente utilizadas, decidiu-se repetir os ensaios com uma das soleiras usadas.

A soleira escolhida foi a de 10 cm de altura e inclinação de 1:1. A figura 4.1 representa as pressões médias brutas registadas nos dois estudos para a posição H para uma vazão de 80L/s, correspondente a um número de Froude igual a 6,91.

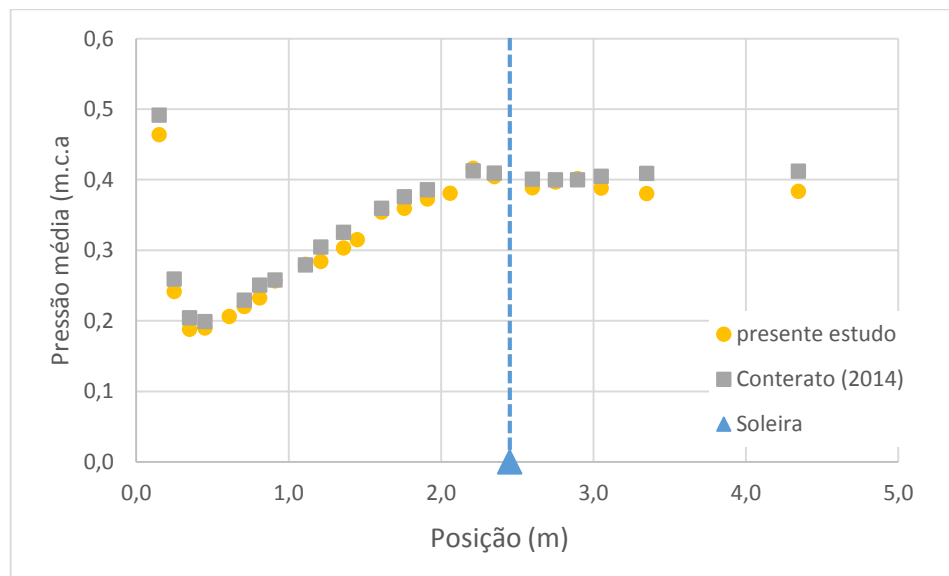


Figura 4.1 - Comparação de estudos para a soleira de 10cm para uma vazão de 80L/s

Como se pode verificar pelos resultados, os ensaios efetuados pelos dois autores seguem a mesma tendência. No entanto observa-se que os dados de pressão média de Conterato (2014) têm uma tendência de serem ligeiramente superiores aos do presente estudo, sendo a variação máxima à volta de 20 mm, com uma variação média de 10 mm e uma variação mínima menor que 1mm. Para os restantes números de Froude ensaiados, contidos no ANEXO I, observa-se que estas diferenças são da mesma ordem grandeza. Estas diferenças podem ser atribuídas a efeitos de laboratório (precisão na medição do nível

a jusante, caudal e dos transdutores) ou mesmo ao próprio escoamento que é altamente turbulento. Sendo estas diferenças consideradas satisfatórias, permitiu concluir que os dados adquiridos estão coerentes com os obtidos por Conterato (2014).

4.1.2. PRESSÕES MÉDIAS BRUTAS

A primeira etapa consistiu em verificar a influência da altura e da posição da soleira terminal no comportamento das pressões médias brutas ao longo do canal. A figura 4.2 com soleira de 6 cm na posição H (245 cm) e os dados de bacia do tipo I (sem soleira).

A figura 4.2 permite verificar que a soleira terminal provoca um aumento na pressão média no interior da bacia uma pequena redução na pressão logo após a soleira para aumentar e depois encontrar a situação de escoamento normal no canal. Este mesmo comportamento foi observado nos demais ensaios, que estão apresentados no ANEXO II.

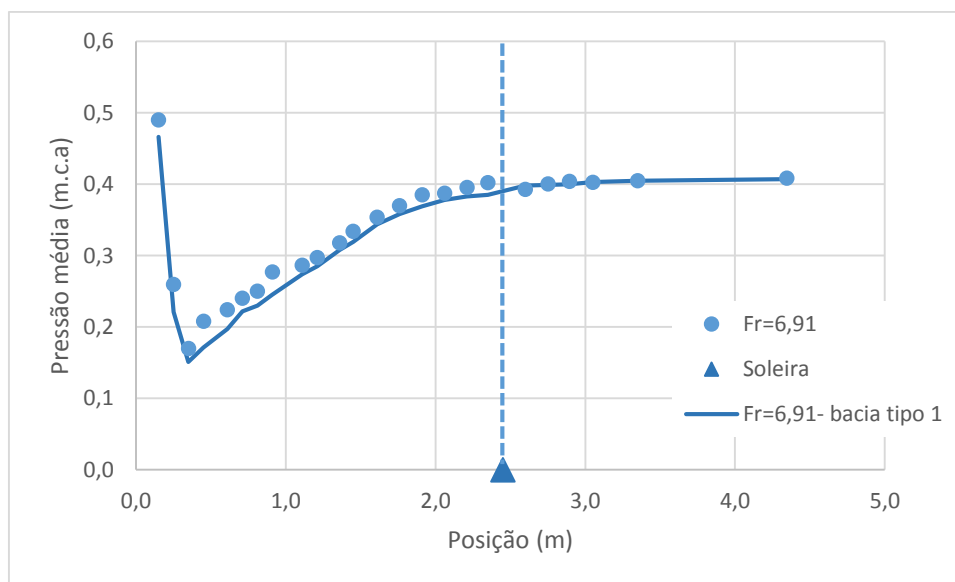


Figura 4.2 - Distribuição longitudinal das pressões médias numa bacia do tipo I e numa bacia com soleira de 6 cm na posição H, para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

Para as três posições de soleiras estudadas, o comportamento em relação às pressões médias brutas foi praticamente idêntico em alguns aspetos. No local onde se encontra posicionada a soleira há uma pequena perturbação, o que provoca um aumento das pressões a montante e uma diminuição a jusante, todavia essas pressões a jusante da soleira terminal (end-sill) tendem a igualar os valores registados da bacia tipo I. Esse ligeiro aumento de valores a montante da soleira deve-se ao afogamento provocado por esta, este afogamento diminui as flutuações de pressão na bacia de dissipação, o que é muito importante para o combate à erosão.

A figura 4.3 mostra, para um caudal de 60L/s para a soleira em estudo (6 cm), o comportamento do escoamento para as diferentes posições adotadas. Quanto mais próxima estiver a soleira do descarregador, maior será a velocidade com que o escoamento será projetado, como se verifica facilmente nas imagens.

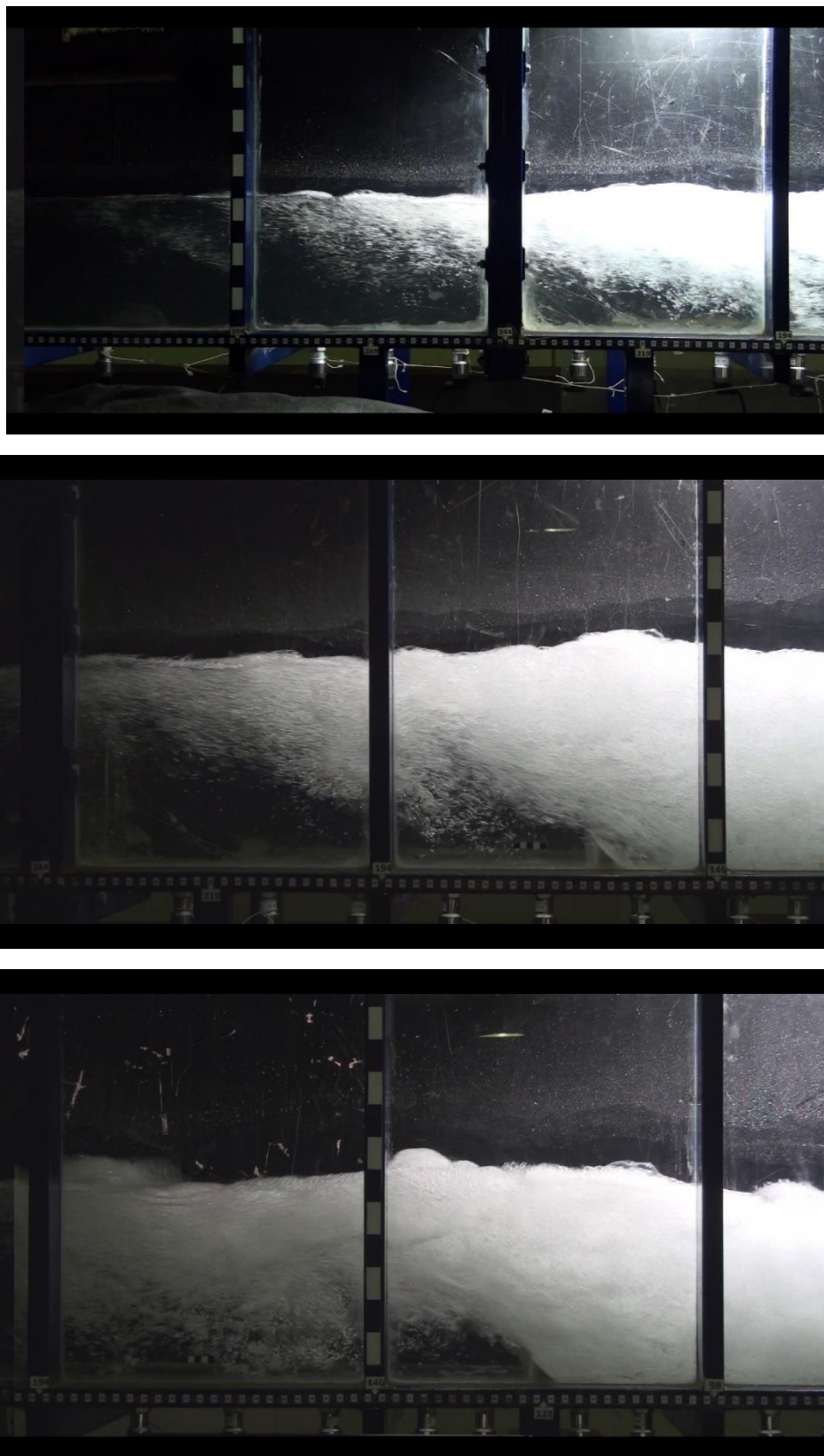


Figura 4.3 – Imagens do escoamento com soleira de 6 cm, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$), nas três posições: 1/1H; 2/3H e 1/2H, respetivamente.

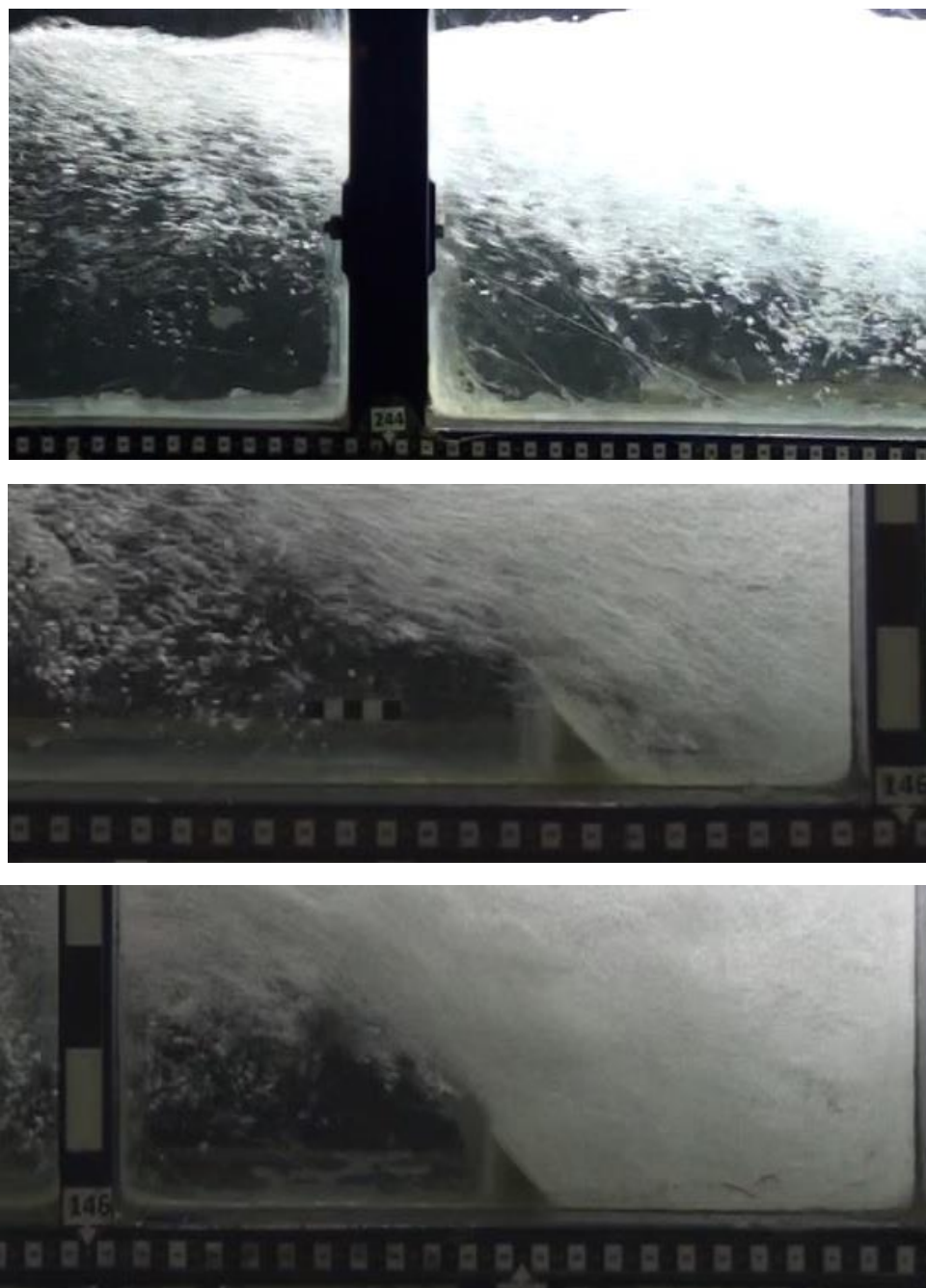


Figura 4.4 - Imagens detalhadas da soleira de 6 cm, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$), nas três posições: $1/1H$; $2/3H$ e $1/2H$, respetivamente.

4.1.3. PRESSÕES MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS

De forma a analisar e comparar as pressões médias foi utilizada uma metodologia proposta por Marques *et al.* (1996). Sendo assim, definiram-se dois parâmetros: o parâmetro “ y_p ”, que representa a pressão adimensionalizada e “ x_p ” que corresponde à distância adimensionalizada,

$$y_p = \frac{(P-Y_1)}{(Y_2-Y_1)} \quad (45)$$

em que:

y_p representa a pressão média adimensionalizada;

P a pressão média bruta (m.c.a);

Y_1 a altura conjugada associada ao escoamento rápido no início do ressalto (m) e

Y_2 a altura conjugada associada ao escoamento lento no final do ressalto (m).

e

$$x_p = \frac{x}{(Y_2-Y_1)} \quad (46)$$

em que:

x_p representa a distância adimensionalizada e

x a distância a partir do pé do descarregador (início do ressalto) (m).

Os resultados das pressões médias brutas foram então adimensionalizados segundo a forma descrita acima. A figura 4.5 mostra os resultados referentes para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$) e posição 2/3H e a sua comparação com os resultados para bacia do tipo I.

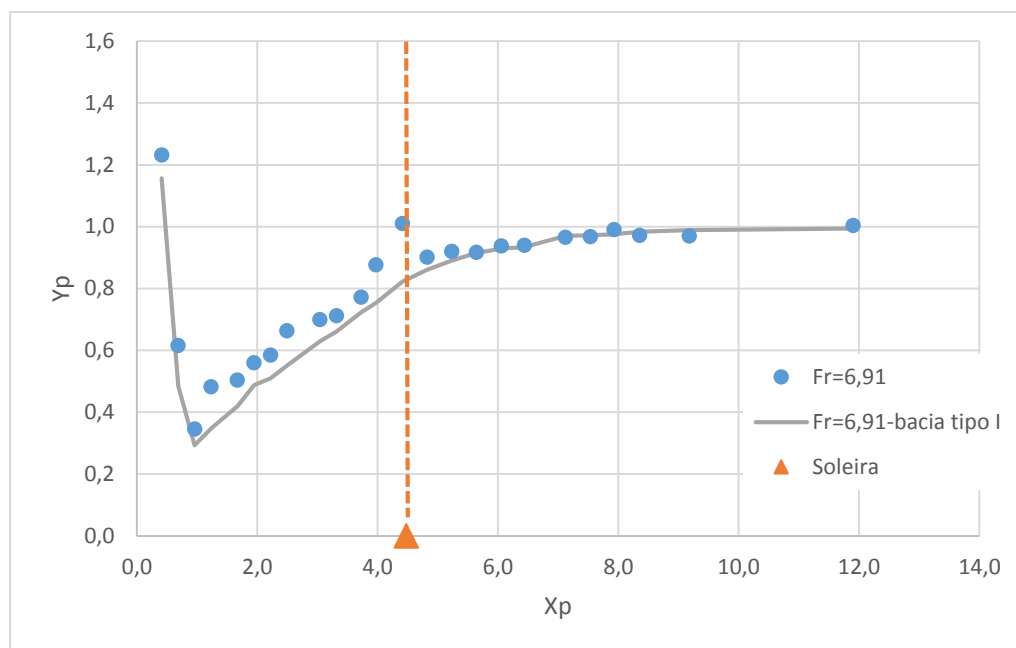


Figura 4.5 - Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para a soleira de 6 cm de altura, na posição $2/3H$ e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) em comparação com os resultados de bacia tipo I.

De forma a perceber-se a influência da altura da soleira nas pressões médias decidiu-se comparar os resultados com o estudo realizado por Conterato, como mostra a figura 4.6.

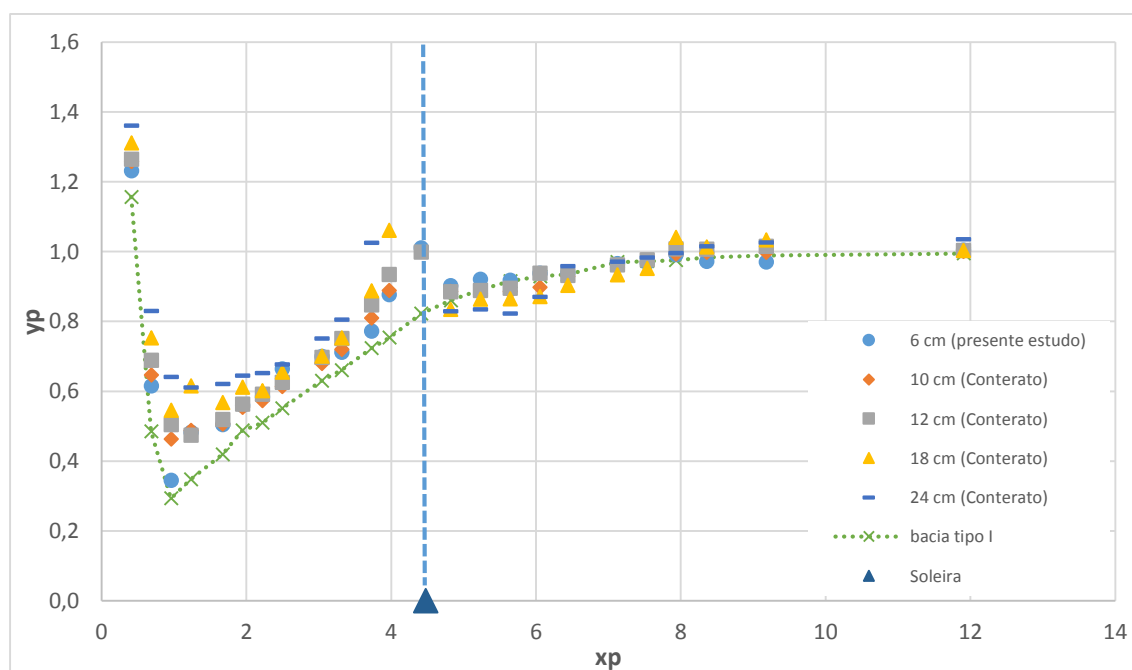


Figura 4.6 - Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para as diferentes alturas de soleira, na posição $2/3H$ e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) em comparação com os resultados de bacia do tipo I.

Os restantes resultados com as diferentes vazões, posições e alturas estão disponíveis no ANEXO III.

Analisando o gráfico da figura 4.6 constata-se que as pressões a montante da soleira são todas maiores do que as de uma bacia do tipo I, sendo que essas pressões são maiores quanto mais alta for a soleira terminal.

A jusante da soleira terminal, obtiveram-se pressões menores nos primeiros transdutores, comparativamente com a bacia do tipo I, e a tendência é que estes valores igualem os registados para esse tipo de bacia. Estas pressões menores podem explicar-se devido a uma recirculação do escoamento de jusante para montante, pois quanto maior for a altura da soleira, maior é a distância onde vai ser projetado esse jato e mais visível é essa recirculação, provocando as baixas pressões logo a jusante da soleira terminal.

Este estudo com a inclusão da soleira de 6 cm veio corroborar estas mesmas conclusões. Verifica-se que, para a situação de montante, se registaram pressões maiores que na bacia do tipo I e menores que as demais soleiras anteriormente utilizadas; para a situação de jusante, como seria de esperar, nas primeiras posições que seguem a soleira terminal, as pressões registadas são maiores quando comparadas com as outras soleiras, uma vez que essa recirculação referida não é tão significativa para soleiras menores.

A figura 4.7 mostra os resultados de pressões médias adimensionalizadas para diferentes configurações de bacia, sem soleira e com a soleira de 6 cm nas três posições estudadas, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

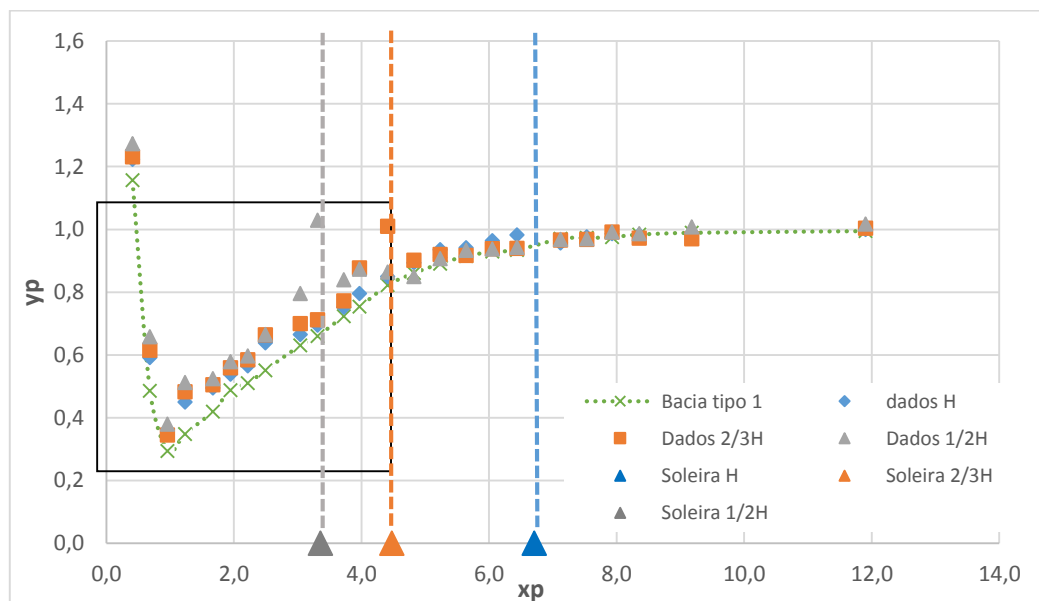


Figura 4.7 - Distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para bacia com soleira de 6 cm e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) para diferentes posições, em comparação com a bacia do tipo I.

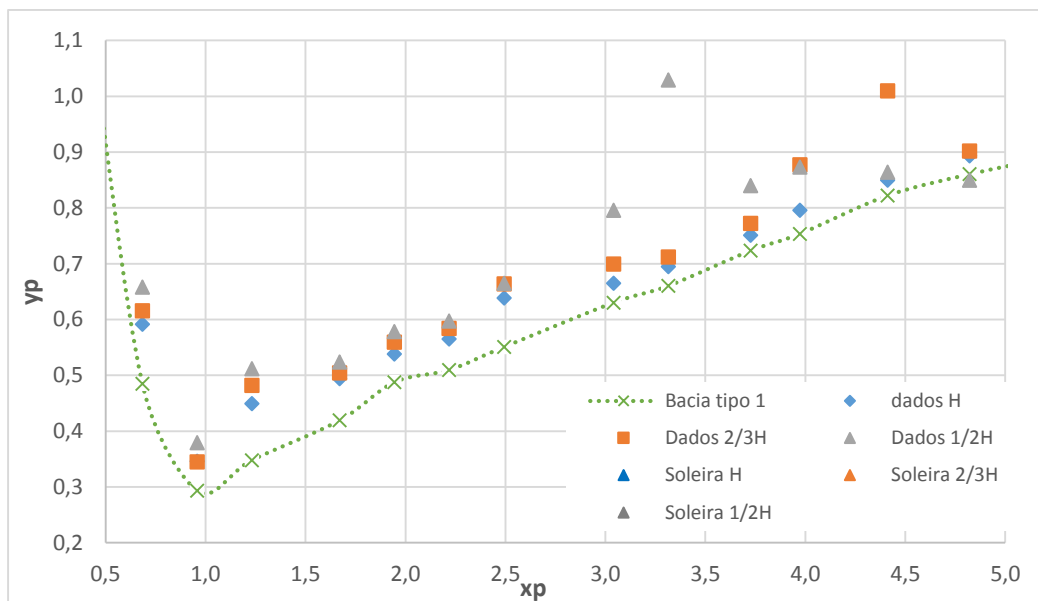


Figura 4. 8 – Detalhe da distribuição longitudinal das pressões médias adimensionalizadas para bacia com soleira de 6 cm e vazão 80L/s ($Fr=6,91$) para diferentes posições, em comparação com a bacia do tipo I.

Como se constata facilmente no gráfico da figura 4,8, quanto mais próxima estiver a soleira do descarregador, maior é a pressão no ponto imediatamente a montante da soleira terminal. Tal como já foi explicado, a velocidade incidente numa soleira é tanto maior quanto mais próxima esta esteja do descarregador, o que pode explicar esse pico de pressão logo a montante da soleira.

Outro aspeto a considerar é que a pressão média no interior da bacia (a montante da soleira terminal) pode sofrer influência da posição em que é colocada, aumentando as pressões médias à medida que a soleira se aproxima do final do descarregador.

Os resultados para as outras vazões estão presentes no ANEXO IV.

No entanto, a análise de pressões médias adimensionalizadas não é suficiente para definir com exatidão qual a melhor altura e posição da soleira a utilizar, de modo a obter-se o seu melhor rendimento. Procedeu-se, então, à análise da flutuação de pressões ao longo da bacia e a jusante dela de modo a definir qual a melhor geometria e posicionamento da soleira terminal.

4.2. ANÁLISE DE RESULTADOS DE FLUTUAÇÕES DE PRESSÕES EM BACIAS COM SOLEIRA TERMINAL COM INCLINAÇÃO 1:1

4.2.1. FLUTUAÇÕES MÉDIAS BRUTAS

A colocação de uma soleira terminal numa bacia de dissipação vai influenciar as flutuações de pressão ao longo deste órgão de dissipação de energia. A presença da soleira terminal provoca um afogamento artificial do escoamento, provocando um amortecimento nas flutuações de pressão. Para jusante, as flutuações tendem a diminuir para depois aumentarem na região de impacto do escoamento, voltando rapidamente à situação normal do escoamento. Os ensaios realizados demonstraram exatamente isso, como provam as figuras 4.9 e 4.10, onde se encontram, juntamente, as flutuações de pressão para uma bacia tipo I e as flutuações com uma soleira de 6 cm de altura para a posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

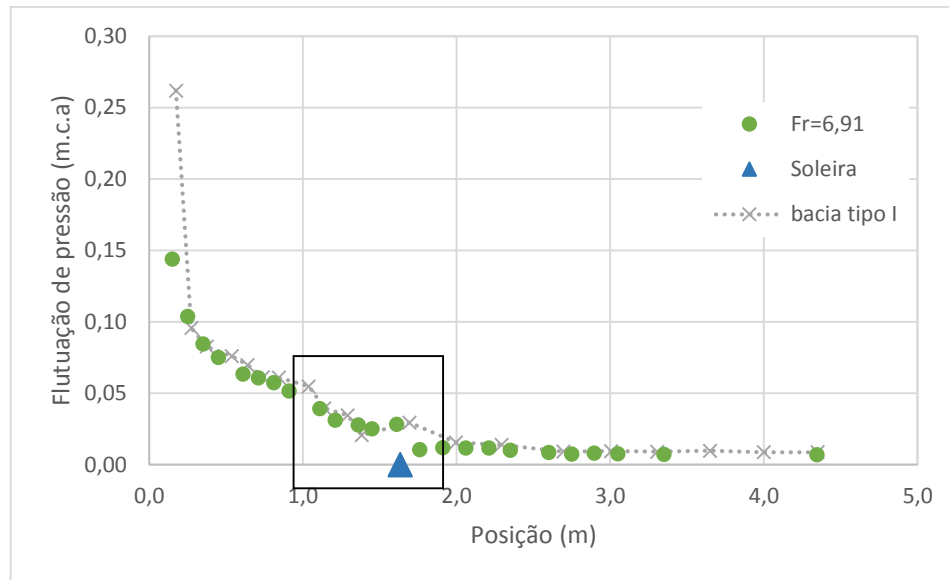


Figura 4.9 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão (desvio padrão da amostra) no fundo da bacia do tipo I com soleira terminal de 6 cm e posição $2/3H$, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

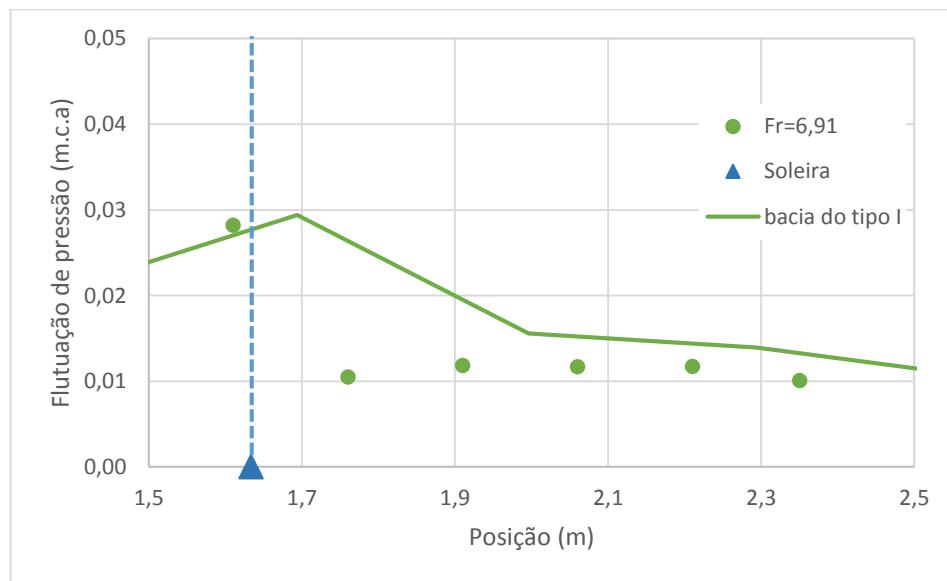


Figura 4. 10 – Detalhe da distribuição longitudinal das flutuações de pressão (desvio padrão da amostra) no fundo da bacia do tipo I com soleira terminal de 6 cm e posição $2/3H$, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

Os demais gráficos para as diferentes vazões e posições de soleira encontram-se no ANEXO V



Figura 4.11 - Escoamento para uma vazão de 80L/s na posição 2/3H e inclinação de 1:1.

Como foi comprovado nos ensaios, as flutuações no interior das bacias na presença de soleiras são menores do que na ausência dela. As diferenças de flutuações de pressão entre os dois casos são mais significativas no início do ressalto, uma vez que a utilização de uma soleira provoca um afogamento artificial no escoamento, tornando as variações de pressão mais suaves.

Assim como foi mencionado para as pressões médias, a recirculação a jusante da soleira também influencia as flutuações de pressão. Essa recirculação é tanto maior, quanto maior for a altura do soleira, já que o jato de água é projetado para uma posição mais a jusante em relação a soleiras menores, havendo uma flutuação maior na mesma posição na presença de soleiras mais pequenas. No entanto, após alguma distância a jusante da soleira terminal, as flutuações de pressão tendem a igualar os valores registados numa bacia do tipo I.

No que toca à posição da soleira, as flutuações de pressão são ligeiramente superiores à medida que esta se encontre mais próxima do descarregador, porém, para a soleira em estudo (6 cm), essa diferença não é muito significativa.

4.2.2. FLUTUAÇÕES MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS

De forma a comparar as flutuações de pressão, tal como nas pressões média, aplicou-se a metodologia proposta por Marques *et al* (1996), ao adimensionalizar as flutuações de pressão e as suas posições como mostra a equação 47.

$$\sigma_p = \frac{\sigma}{H_t} \cdot \frac{Y_2}{Y_1} \quad (47)$$

em que:

σ_p representa a flutuação de pressão adimensionalizada;

σ a flutuação de pressão (m) e

H_t a perda de carga ao longo do ressalto (m).

As posições das soleiras (H ; $2/3H$ e $1/2H$) foram igualmente adimensionalizadas, seguindo a mesma metodologia. Os resultados dessas adimensionalizações estão expostos na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Posições relativas das soleiras

Fr	Y_2 (m)	Y_1 (m)	Posição relativa		
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	0,060	5,86	3,90	2,93

As figuras 4.12 e 4.13 representam a flutuação de pressões adimensionalizadas na soleira de 6 cm de altura em comparação com a bacia de tipo I, já as figuras 4.14 a 4.16 revelam o complemento do estudo elaborado por Conterato (2014) juntando os resultados da soleira do presente trabalho aos das restantes já anteriormente estudadas. As flutuações de pressão para as diferentes vazões e posições para a soleira de 6 cm encontram-se no anexo VI.

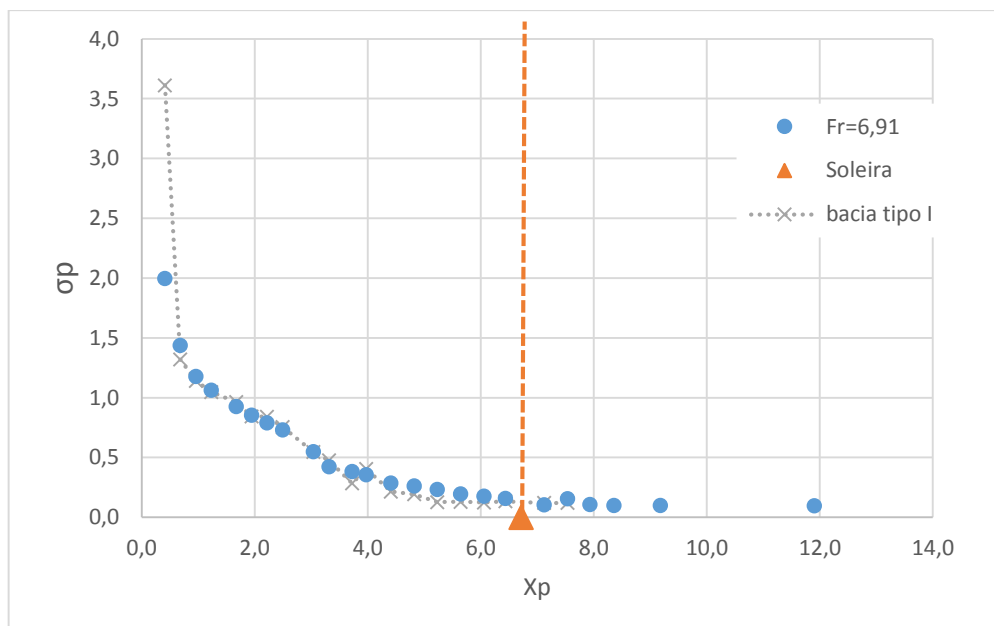


Figura 4.12 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleira terminal de 6 cm e posição $2/3H$, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

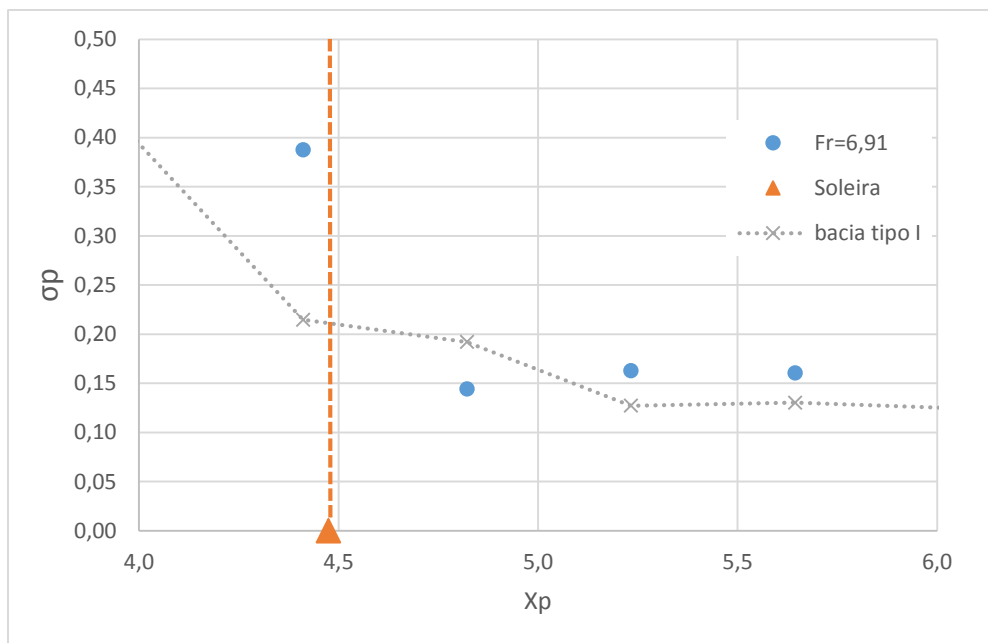


Figura 4.13 - Detalhe da distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleira terminal de 6 cm e posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

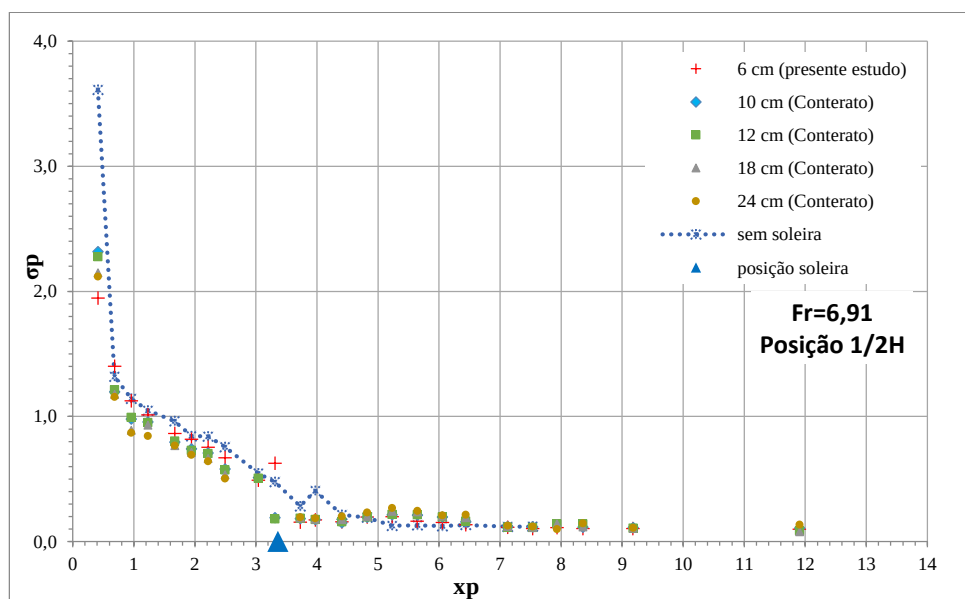


Figura 4.14 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleiras diferentes para a posição 1/2H, para vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

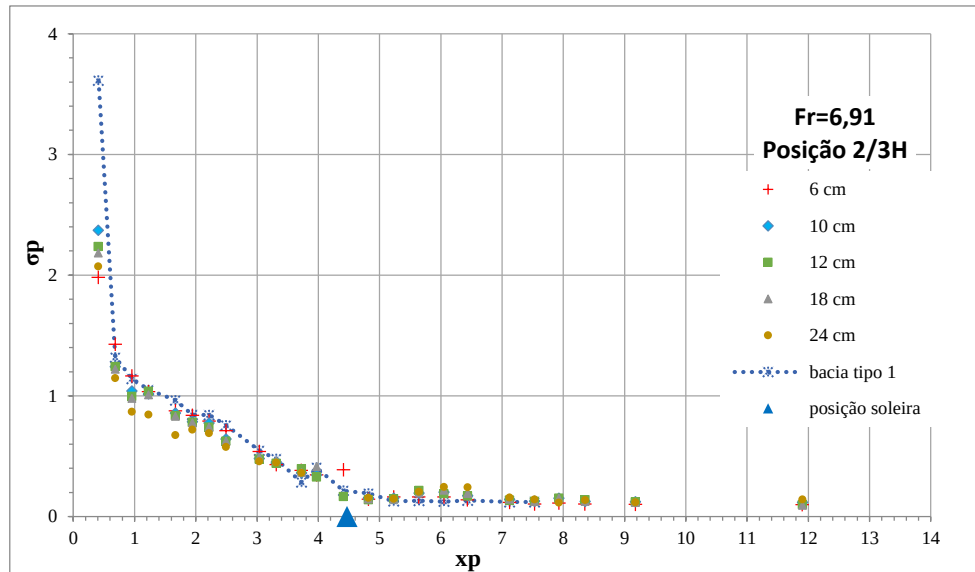


Figura 4.15 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleiras diferentes para a posição 2/3H, para vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

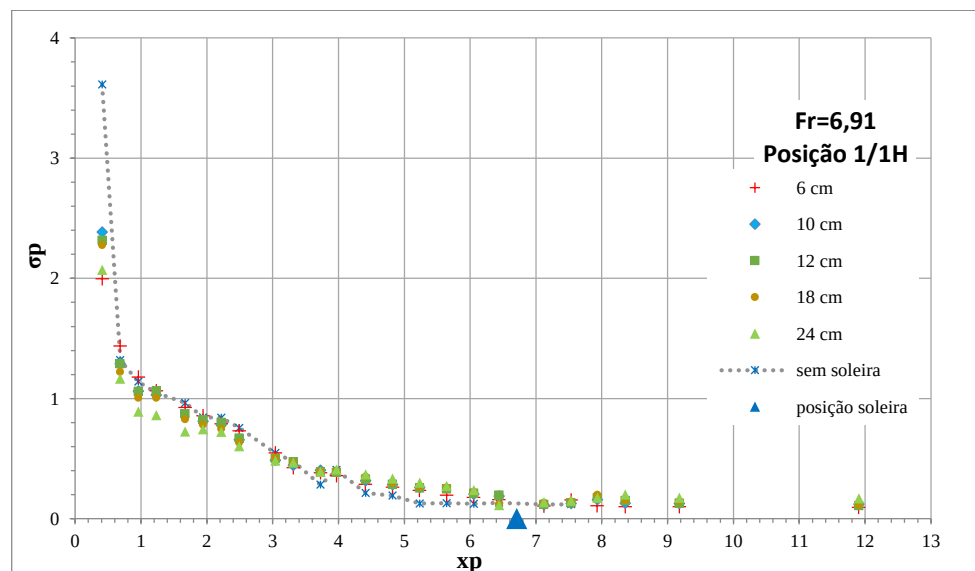


Figura 4.16 - Distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas para a bacia do tipo I e bacia com soleiras diferentes para a posição H, para vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

Ao analisar-se as figuras 4.14 a 4.16 observa-se que:

- O ponto de máxima flutuação de pressão ocorre na região de impacto do jato ($\sigma_{p_{máx.}}$);
- A flutuação de pressão cai rapidamente até à posição $(4.X)/(Y_2-Y_1)$ – ponto de descolamento do escoamento segundo Lopardo (1986) e Marques (1997);
- Após a soleira, as flutuações apresentam uma diminuição, contudo no ponto onde o escoamento foi lançado pela soleira é registado o ponto de flutuação máxima, ($\sigma_{p_{máx.}}$), que de seguida diminuirá até encontrar o valor de flutuação normal do escoamento se não houvesse soleira.

Ao fazer uma análise pormenorizada a jusante da soleira, denota-se que há um pico correspondente a um máximo do valor da flutuação. Um exemplo disso é a figura 4.17 que mostra esse valor, denominado de $\sigma_{pm\acute{a}x}$. Esse valor pode ser explicado como sendo o valor da máxima flutuação que ocorre a jusante de uma soleira, na região de incidência do jato, Marques (1995).

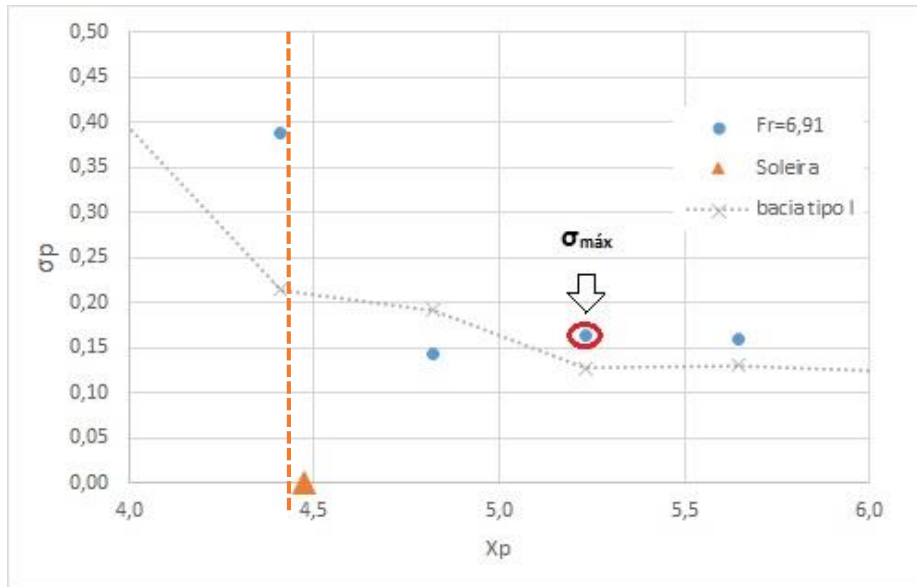


Figura 4.17 - Análise do trecho a jusante da soleira.

A situação mais desejável é que este valor de flutuação máxima seja o menor possível, de modo a que o escoamento volte às condições naturais a jusante do descarregador o mais rápido possível, reduzindo a possibilidade de erosão do leito e de danos a jusante que é o principal objetivo do dimensionamento de uma bacia de dissipação. Todavia, a quantificação desse valor de flutuação máxima não é o único fator a ser levado em consideração no dimensionamento. A localização onde o escoamento incide após a soleira (local de máxima flutuação de pressão) também tem a sua importância. Caso o escoamento incida próxima da estrutura, a erosão do leito pode comprometer a segurança da estrutura. Quanto mais longe incidir o escoamento melhor, logo não só o valor de $\sigma_{pm\acute{a}x}$. É importante, mas a sua posição relativa em relação à posição da soleira terminal.

Segundo Elevarstosky (1959), o comprimento da bacia (L_b), e portanto a posição da soleira terminal, deve ter em conta as características geológicas a jusante da estrutura, então:

- solos facilmente erodíveis: $L_b \geq 6,9 (Y_2 - Y_1)$;
- solos não facilmente erodíveis: $L_b \geq 4,2 (Y_2 - Y_1)$.

Baseado, na recomendação de Elevarstosky (1959), foram feitas suposições de análises para situações de:

- solos facilmente erodíveis – encontrar a condição do menor valor de flutuação de pressão máxima a jusante da soleira (menor valor de $\sigma_{pm\acute{a}x}$);
- solos não facilmente erodíveis – encontrar a menor relação (ϖ) entre a flutuação de pressão máxima a jusante adimensionalizada ($\sigma_{pm\acute{a}x}$) e a distância relativa à soleira ($\Delta x_{m\acute{a}x}$) onde ocorre $\sigma_{pm\acute{a}x}$.

4.2.3. Análise do parâmetro ϖ

Foi estabelecido um critério que relaciona a flutuação máxima a jusante da soleira terminal ($\sigma_{\text{máx}}$) com a distância a que esta flutuação ocorre, denominada de ϖ como mostra a equação 48.

$$\varpi = \frac{\sigma_{p \text{ máx}}}{\Delta x_{\text{máx}}} \quad (48)$$

em que:

$\sigma_{p \text{ máx}}$ representa o máximo valor de flutuação adimensionalizada após a soleira e

$\Delta x_{\text{máx}}$ a distância adimensionalizada entre o final da soleira e o ponto de máxima flutuação.

A altura da soleira foi adimensionalizada pela altura conjugada associada ao escoamento rápido, de maneira a ser relacionada com a relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre.. Essa adimensionalização é dada por pela equação 49.

$$\frac{s}{Y_1} \quad (49)$$

em que:

s representa a altura da soleira (m) e

Y_1 a altura conjugada associada ao escoamento rápido.

Todos esses valores encontram-se adimensionalizados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Valores de alturas de soleira adimensionalizados para cada número de Froude.

F_{r1}	7,44	6,98	6,91	6,34	5,98
Y_1 (m)	0,026	0,036	0,044	0,054	0,06
$s = 0 \text{ cm}^*$	0	0	0	0	0
$s = 6 \text{ cm}$	2,31	1,67	1,36	1,11	1,00
$s = 10 \text{ cm}$	3,85	2,78	2,27	1,85	1,67
$s = 12 \text{ cm}$	4,62	3,33	2,73	2,22	2,00
$s = 18 \text{ cm}$	6,92	5,00	4,09	3,33	3,00
$s = 24 \text{ cm}$	9,23	6,67	5,45	4,44	4,00

*Bacia tipo I

Nesta análise incluiu-se também a bacia do tipo I ($s=0\text{cm}$), sendo considerado o seu final com as três posições estudadas (H ; $2/3H$ e $1/2H$). Deve-se realçar que para bacias do tipo I deve haver um comprimento mínimo que tem em conta o tipo de geologia e o comprimento do ressalto e este valor deve estar após a região de máxima flutuação de pressão no interior da bacia, ou seja, $\geq 2(Y_2-Y_1)$, recomendado $\geq 4(Y_2-Y_1)$, após o ponto de descolamento do escoamento, posição em que as velocidades começam a diminuir rapidamente no ressalto. Elevarstosky (1959) recomenda solos não facilmente erodíveis: $L_b \geq 4,2(Y_2-Y_1)$

As flutuações de pressão em bacias do tipo I tendem a diminuir com o decorrer do escoamento, principalmente quando se atinge a posição aproximada de $2.(Y_2-Y_1)$, como mostra a figura 4.18.

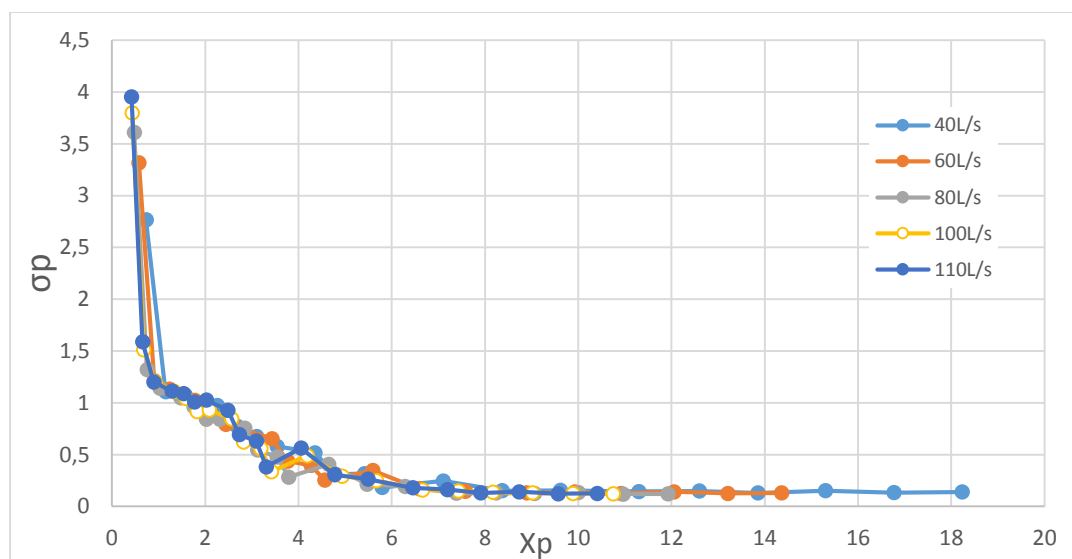


Figura 4.18 - Flutuações de pressão em bacias do tipo I para diferentes vazões.

Então, para o caso da bacia do tipo I, foi considerada como flutuação máxima aquela que ocorre na posição final da bacia, contudo com $\Delta x_{\text{máx}} = 1.(Y_2-Y_1)$, uma vez que para pontos a montante desta posição, a relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre tende para infinito, então a escolha da posição $1.(Y_2-Y_1)$ foi tida como razoável, já que a jusante desta os valores das flutuações encaminham-se para resultados mais reduzidos.

A figura 4.19 apresenta os valores obtidos por Conterato (2014) (figuras preenchidas) acrescido dos valores do presente estudo (figuras sem preenchimento) em função da altura da soleira adimensionalizada para cada posição de soleira, para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$). Os resultados para as restantes vazões encontram-se no ANEXO VII.

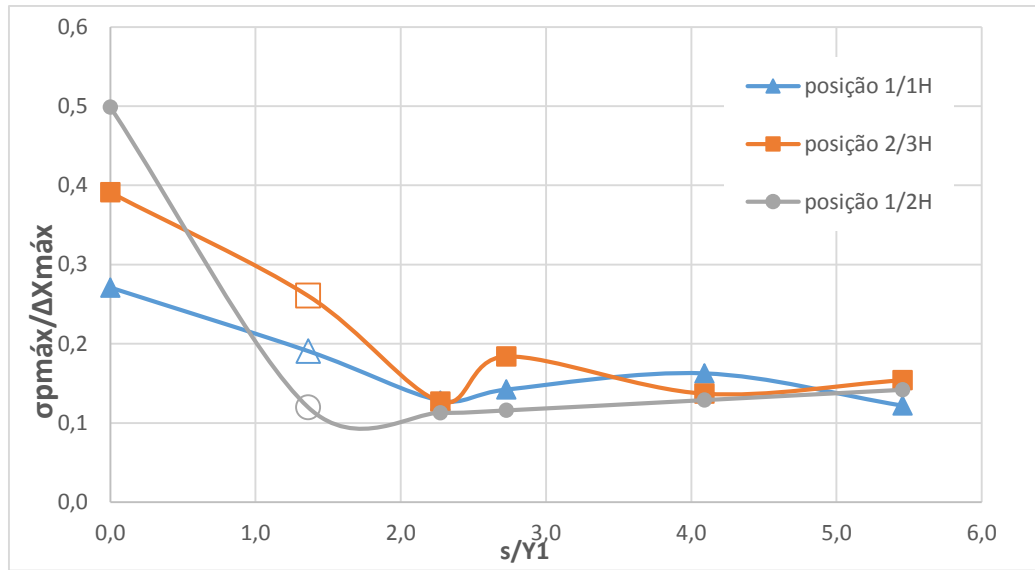


Figura 4.19 - Resultados do parâmetro σ em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

A partir da análise destes gráficos identificou-se, para cada uma das vazões, qual a que apresentava a melhor solução para cada uma das posições, isto é, a que apresentava o menor parâmetro σ . A inserção da soleira de altura menor que as propostas por Conterato (2014) veio demonstrar que esta alternativa de soleira não é a solução ideal, visto que para todas as vazões e posições, o parâmetro σ encontrado foi sempre maior. Deste modo, a melhor solução, em relação ao parâmetro σ , poderá estar numa altura entre estas duas referidas (6 cm e 10 cm).

A tabela 4.3 mostra os menores valores do parâmetro σ encontrados para as diversas vazões e posições da soleira terminal. Não tendo encontrado um melhor desempenho nesta nova soleira, a tabela é igual à apresentada por Conterato (2014).

Tabela 4.3 - Menores valores do parâmetro σ

F_r	Posição	$L/(Y_2-Y_1)$	s/Y_1	$\Delta x_{máx}$	$\sigma_{máx}/\Delta x_{máx}$
7,44	1/1	10,27	3,85	1,87	0,109
	2/3	6,83	3,85	1,81	0,105
	1/2	5,13	3,85	3,51	0,051
6,98	1/1	8,09	2,78	1,47	0,119
	2/3	5,38	2,78	1,42	0,136
	1/2	4,04	2,78	1,77	0,113
6,91	1/1	6,71	2,27	1,65	0,122
	2/3	4,47	2,27	1,59	0,127
	1/2	3,36	2,27	1,87	0,113
6,34	1/1	6,05	1,85	1,10	0,163
	2/3	4,03	1,85	1,43	0,152
	1/2	3,03	1,85	2,43	0,105
5,98	1/1	5,86	2,00	1,44	0,141
	2/3	3,91	3,00	1,72	0,149
	1/2	2,93	1,67	2,36	0,122

A partir da tabela, Conterato (2014) elaborou o gráfico da figura 4.20, onde concluiu que a altura adimensional da soleira não varia significativamente com a posição em que é colocada, ou seja, a altura ideal da soleira é independente da posição onde é colocada. Apenas para a maior vazão (110L/s; $Fr=5,98$) houve mudanças em relação à altura adimensionalizada. Observou-se também que a altura adimensionalizada aumenta com o aumento do número de Froude.

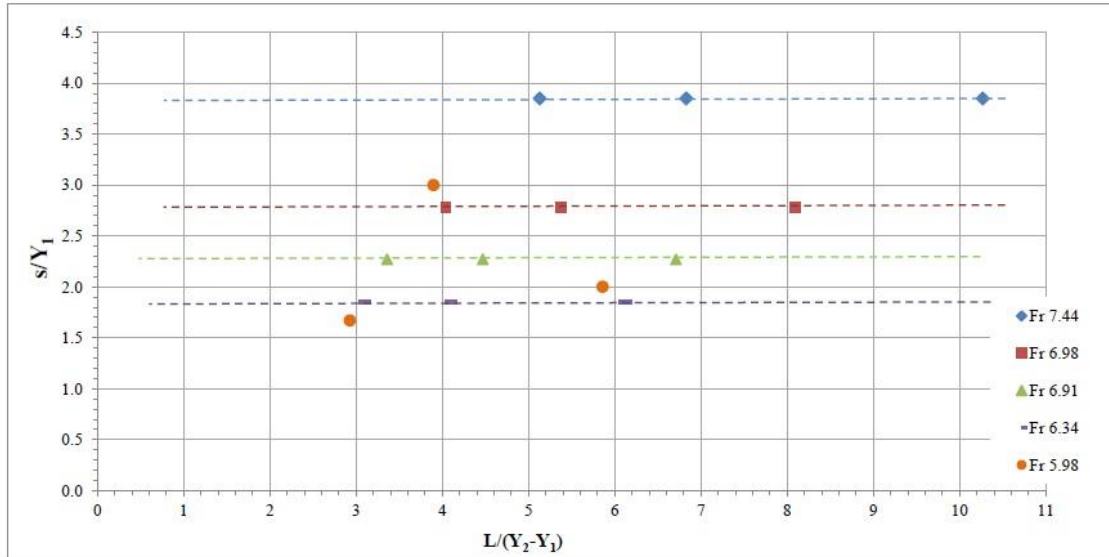


Figura 4.20 - Valores adimensionalizados de posições das soleiras por altura das soleiras adimensionalizadas (Conterato, 2014) e confirmados pelo presente estudo.

De seguida, foram analisados os menores valores da relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre encontrados para cada posição em função de cada número de Froude. A figura 4.21 demonstra essa relação, onde se verifica que para as posições $1/1H$ e $2/3H$ os valores dos parâmetros ϖ não diferem muito, verificando-se uma certa diferença para a posição $1/2H$, esta diferença pode dever-se ao fato de a velocidade com que o escoamento atinge a soleira terminal ser superior às demais posições, sendo o jato projetado para uma posição mais a jusante, contribuindo para um $\Delta x_{\text{máx}}$ maior e, consequentemente, um parâmetro ϖ menor.

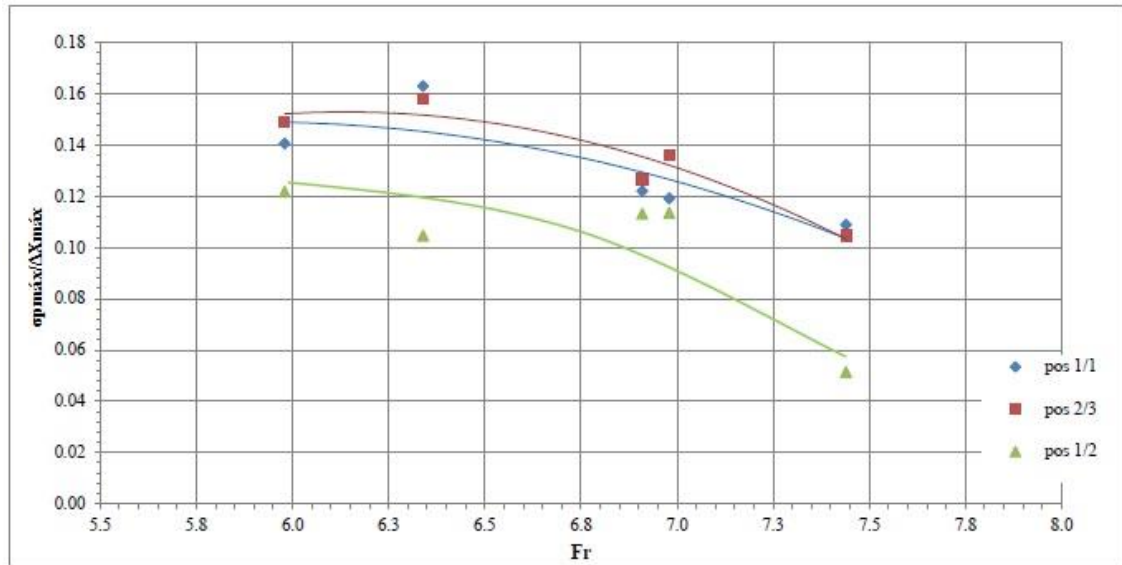


Figura 4.21 - Valores de parâmetro ω em função do número de Froude, para soleira adimensionalizada nas 3 posições dentro da bacia (Conterato, 2014), valores confirmados pelo presente estudo.

Foi ainda analisada a relação entre o parâmetro ω com a posição da soleira adimensionalizada para cada uma das vazões, como evidencia a figura 4.22.

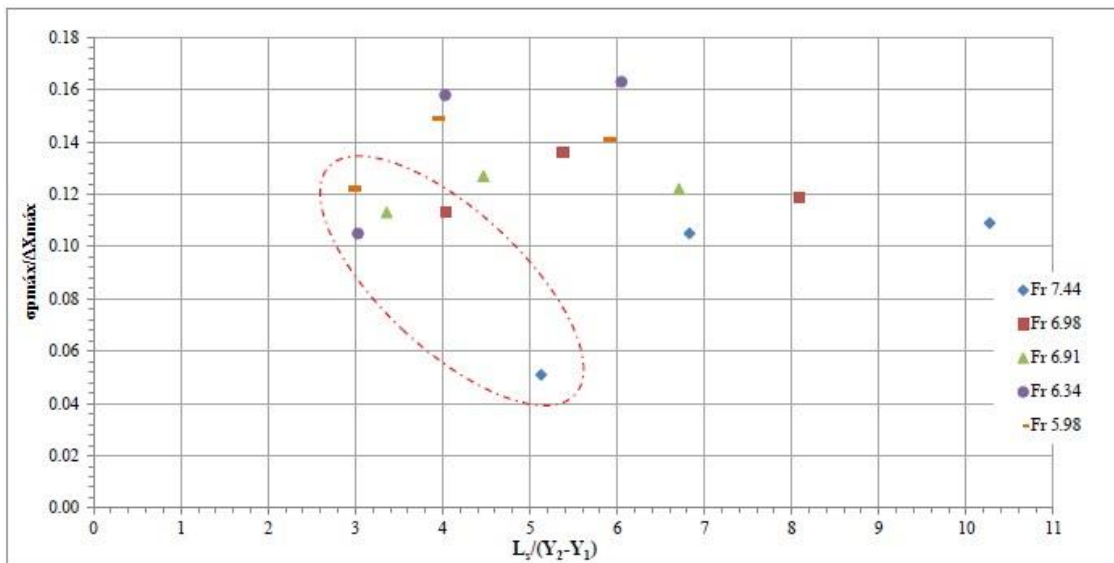


Figura 4.22 - Valores de parâmetro ω em função das posições das soleiras adimensionalizadas para as 5 vazões (Conterato, 2014).

Tal como mostra a figura, para cada uma das vazões ensaiadas, os melhores valores relativos a essas relações são os da posição 1/2H. Foi então elaborada uma curva de variação da altura da soleira adimensionalizada em função do número de Froude para essa posição, representada na figura 4.23. Esta curva revela a melhor altura para cada vazão, onde também se pode verificar que a altura adimensionalizada aumenta com o número de Froude.

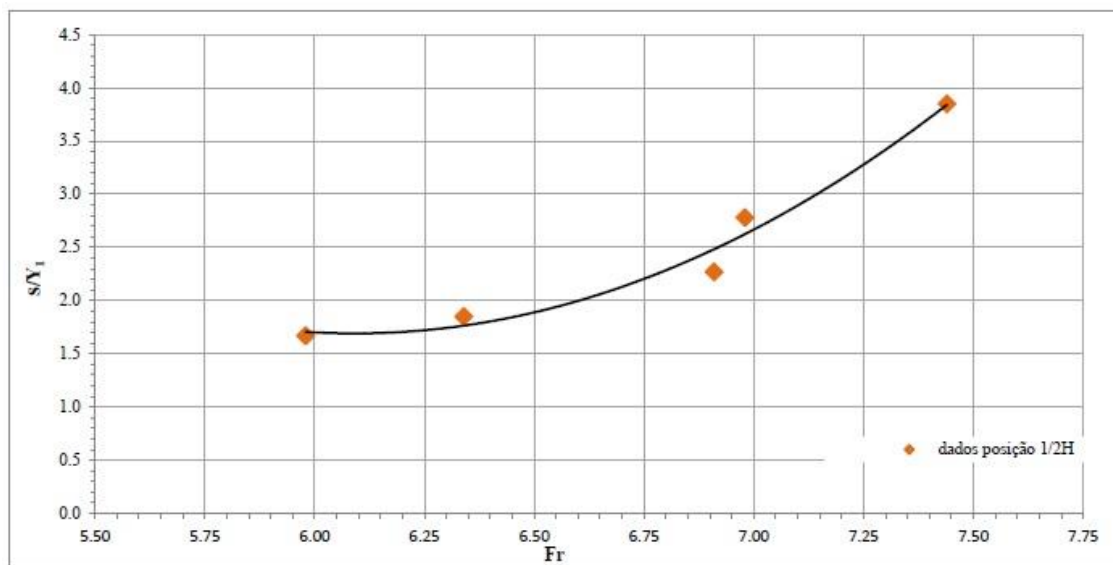


Figura 4.23 - Altura da soleira adimensionalizada para cada número de Froude, para a posição 1/2H (Conterato, 2014), valores confirmados pelo presente estudo.

Foi aplicada a mesma metodologia, no entanto desta vez para relacionar a posição da soleira adimensionalizada com o número de Froude. A figura 4.24 ilustra que o comprimento da bacia deve ser superior a $3(Y_2 - Y_1)$ para solos facilmente erodíveis, todavia aconselha-se a utilizar o valor mínimo de $4(Y_2 - Y_1)$, Elevarstosky (1959) para solos não facilmente erodíveis recomenda $L_b \geq 4,2 (Y_2 - Y_1)$. Porém, estes valores não são constantes e variam com o número de Froude, como pode ser visto na figura 4.24, onde se observa que para escoamento com Froude superiores a 7,0 necessitam de um valor superior a $4(Y_2 - Y_1)$.

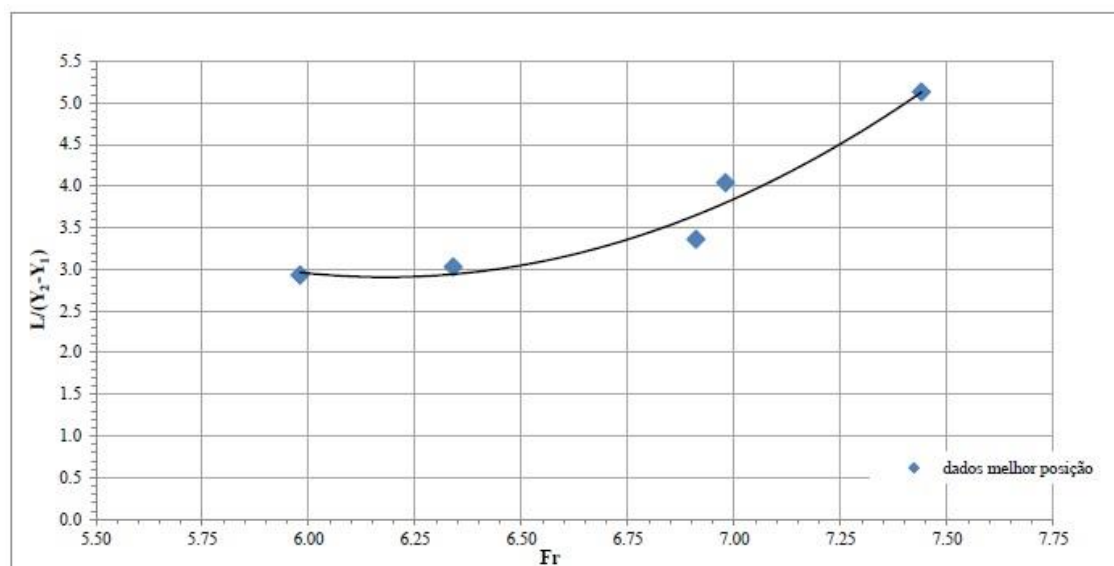


Figura 4.24 - Posição da soleira adimensionalizada (para cada número de Froude) que apresentou a menor parâmetro ϖ (Conterato, 2014).

No que respeita à análise deste parâmetro ϖ , estes valores devem ser aplicados apenas a solos não facilmente erodíveis. Na análise seguinte, relativa às flutuações máximas a jusante da soleira terminal,

o principal foco é para solos facilmente erodíveis, já que a erosão a jusante da bacia de dissipação é um fenómeno de máxima importância e procurar-se-á um critério para se obter o menor valor de flutuação de pressão máxima a jusante da soleira ($\sigma_{pm\acute{a}x}$). Sendo assim, o principal objetivo da próxima análise passa por encontrar o menor valor de flutuação máxima a jusante da soleira terminal.

4.2.4. MÁXIMO VALOR DE FLUTUAÇÃO A JUSANTE DE UMA SOLEIRA TERMINAL

Outra abordagem realizada com o intuito de complementar a análise anterior, foi verificar onde se registava o máximo valor de flutuação ($\sigma_{pm\acute{a}x}$) a jusante da soleira terminal e também para uma bacia do tipo I.

Para uma bacia tipo I, Conterato (2014) considerou que o valor máximo de flutuação a jusante da soleira seria o ponto onde se registasse a maior flutuação a jusante de onde a soleira estivesse hipoteticamente colocada.

A figura 4.25 representa a relação das flutuações máximas adimensionalizadas ($\sigma_{pm\acute{a}x}$) com as alturas de soleiras adimensionalizadas, neste caso para um número de Froude igual a 6,91. Os restantes gráficos relativos às outras vazões encontram-se no ANEXO VIII.

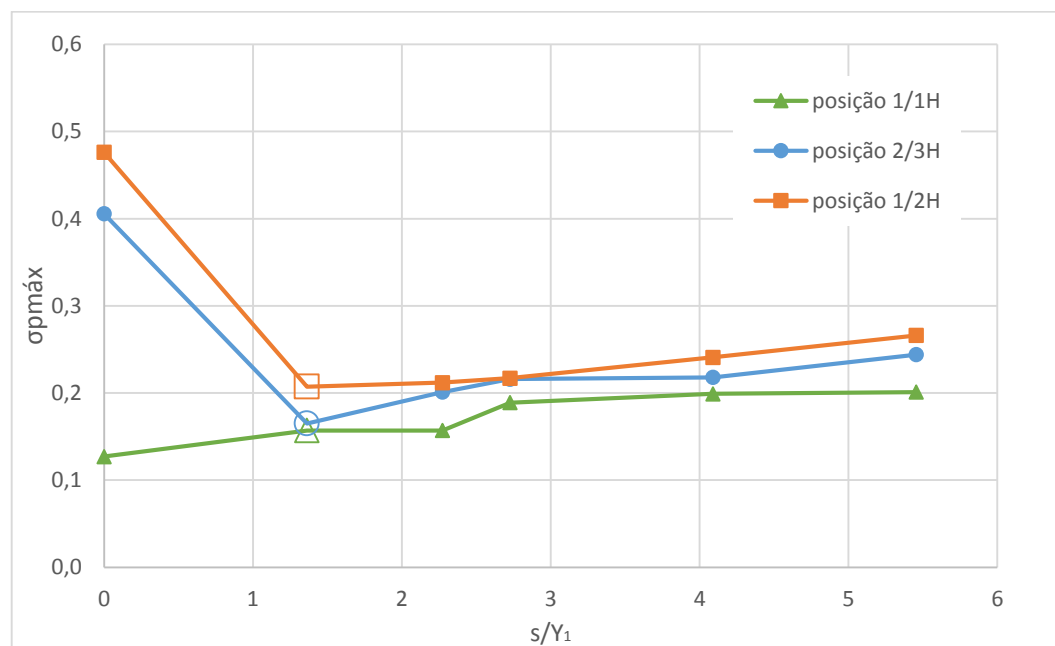


Figura 4.25 - Valores adimensionalizados de máxima flutuação em função da altura adimensionalizada da soleira para as 3 posições e uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

Conforme se pode verificar no ANEXO IX, para todas as vazões e posições testadas, a soleira de 6 cm de altura induz uma flutuação máxima menor, comparativamente às demais soleiras estudadas anteriormente por Conterato (2014), como era expectável.

Analisando os diversos gráficos, estes resultados vieram corroborar o já observado anteriormente:

- a) Para a posição 1/1H, $L_s = 6,71 (Y_2 - Y_1)$:
- O valor de $\sigma_{pm\acute{a}x}$ é proporcional a s/Y_1
 - O menor valor de $\sigma_{pm\acute{a}x}$ ocorreu sempre para a bacia do tipo I ($s/Y_1=0$). Isto pode dever-se ao fato de a posição adimensionalizada ser maior que 6 ($Y_2 - Y_1$), ou seja, encontra-se na zona de final do rolo do ressalto (Lopardo (1986) e Marques *et al.* (1996)), zona essa onde se verificou que grande parte da energia já tinha sido dissipada (cerca de 90%) e não existiam grandes flutuações de pressão.
- b) Para a posição 2/3H, $L_s = 4,47 (Y_2 - Y_1)$:
- Os valores máximos de $\sigma_{pm\acute{a}x}$ encontram-se para a bacia do tipo I. Como já foi referido anteriormente, os valores mínimos de flutuação máxima foram encontrados para a soleira de 6 cm de altura. Para as restantes alturas, o valor das flutuações aumenta de uma forma quase proporcional. As velocidades diminuem gradualmente até encontrarem a velocidade média lenta no fim do ressalto. Nesta posição a soleira funciona como uma rampa de lançamento, projetando o escoamento para uma posição mais a jusante, afastado do fim da bacia, onde se verificam as maiores flutuações.
- c) Para a posição 1/2H:
- Apresenta um comportamento idêntico ao da posição 2/3H, no entanto com valores de flutuação mais elevados, presumivelmente devido à velocidade de lançamento do escoamento. Essa velocidade faz com que o impacto do jato seja lançado mais a jusante, comparativamente com a posição 2/3H.

A partir da análise de todos os gráficos presentes no ANEXO IX, retirou-se o menor valor de $\sigma_{pm\acute{a}x}$ para cada posição da soleira. Esses valores foram relacionados com o posicionamento adimensionalizado da soleira, para cada número de Froude. A maior parte desses menores valores de flutuações máximas adimensionalizadas foram encontradas para a soleira de 6 cm, o que levou a uma atualização do gráfico elaborado previamente por Conterato (2014), conforme evidencia a figura 4.26.

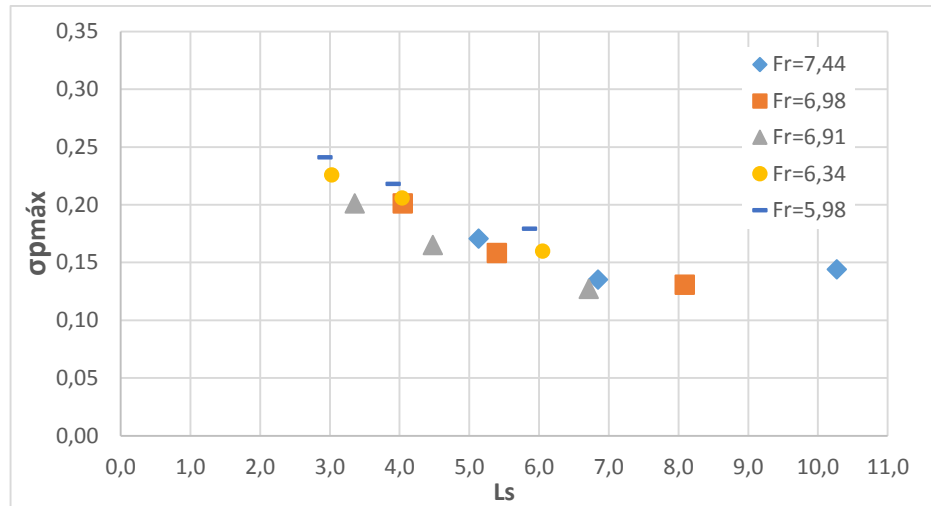


Figura 4.26 - Menores valores de flutuação máxima adimensionalizada encontrados, em função da posição da soleira adimensionalizada.

Outra análise efetuada foi relacionar a altura adimensionalizada com a posição adimensionalizada para os casos onde se registaram os menores valores de $\sigma_{pmáx}$.

A figura 4.27 mostra essa análise realizada por Conterato (2014), enquanto a figura 4.28 demonstra a análise do presente estudo. A principal diferença entre estas figuras deve-se ao valor da altura, já que foi para a soleira de 6 cm que se encontraram os menores valores de flutuação máxima adimensionalizada.

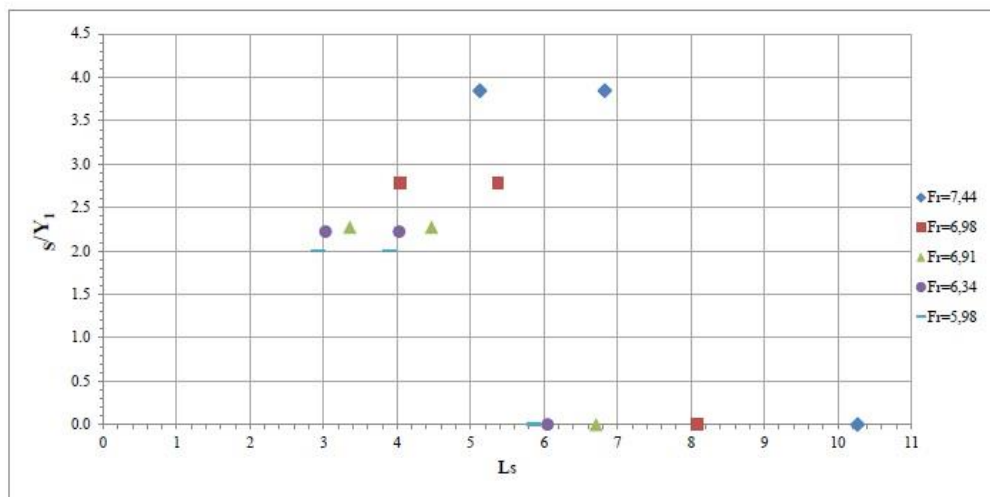


Figura 4.27 - Valores de altura adimensionalizada em função da posição adimensionalizada, para cada número de Froude (Conterato, 2014).

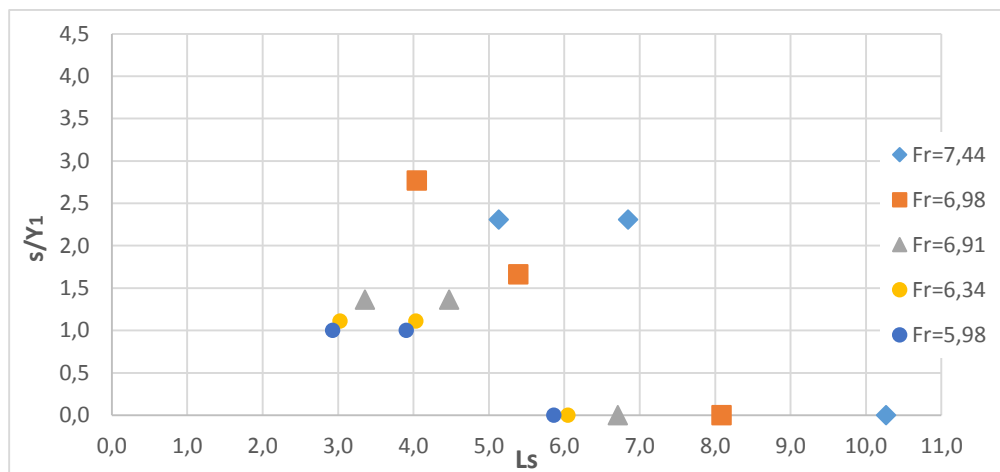


Figura 4.28 - Valores de altura adimensionalizada em função da posição adimensionalizada, para cada número de Froude.

No entanto, a tendência observada foi praticamente a mesma. À exceção da posição 1/1H, para o mesmo número de Froude, as alturas adimensionalizadas que originaram os menores valores de $\sigma_{pmáx}$ foram as mesmas, apresentando um valor constante. A única vazão em que tal não sucedeu foi a de 60L/s ($F_{r1}=6,98$) em que, relativamente à posição 2/3H, a melhor opção seria a soleira de 6 cm, enquanto para a posição 1/2H a melhor solução seria a de 10 cm. Através destas análises foi construído um gráfico que relaciona a altura da soleira adimensionalizada correspondente ao menor valor de $\sigma_{pmáx}$ com o número de Froude, tal como foi feita na análise da relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto ao ponto onde essa flutuação ocorre.

Conterato (2014) concluiu que a melhor condição e altura de soleira encontrada na análise de flutuação máxima foi a encontrada na análise da relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre, todavia o presente estudo não veio demonstrar a mesma relação, já que no que diz respeito à flutuação de pressão foi encontrada uma melhor solução, como evidencia a figura 4.29.

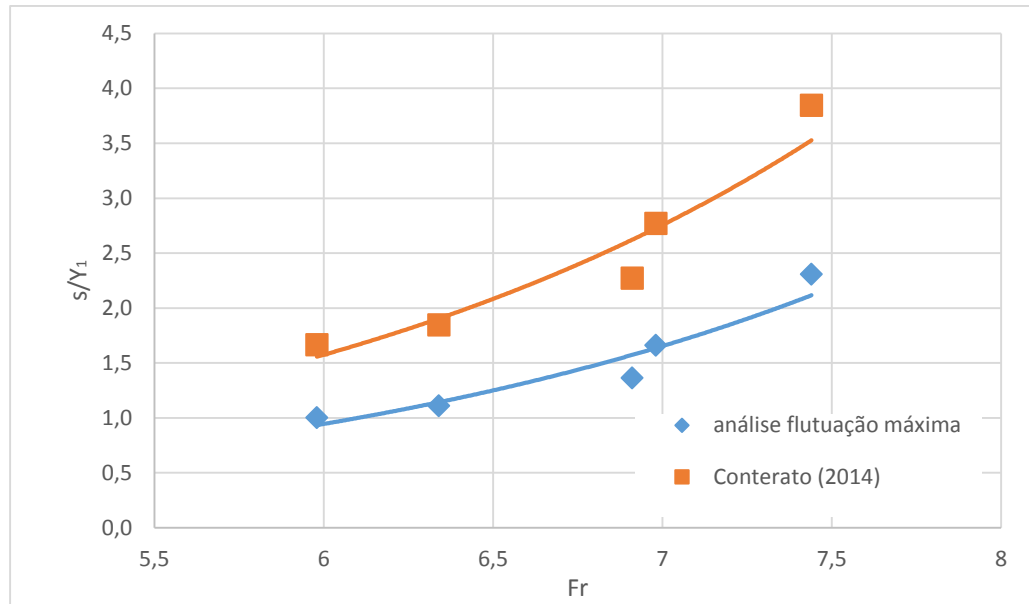


Figura 4.29 - Valores de altura de soleira adimensionalizados que fornecem o menor valor de flutuação máxima adimensionalizada, em função do número de Froude, em contraste com os resultados de Conterato (2014).

4.2.5. ANÁLISE DO MÁXIMO VALOR DE FLUTUAÇÃO A MONTANTE DA SOLEIRA

Esta análise parte do que já foi observado por Conterato (2014). À medida que a altura da soleira terminal aumenta, as flutuações a montante tendem a diminuir. O afogamento artificial causado pela inserção da soleira contribui na estabilização do escoamento no interior da bacia, diminuindo as flutuações de pressão.

Estes valores de flutuação podem ser mais reduzidos para soleiras de altura maior, no entanto, para algumas situações, Conterato verificou que o escoamento atinge a altura crítica sobre a soleira provocando um escoamento do tipo Weir flow, isto é, a soleira funciona como um novo descarregador, como ilustra a figura 4.30.



Figura 4.30 - Escoamento tipo Weir flow (Conterato, 2014).

Este tipo de escoamento foi avistado para algumas posições, para um Froude de 7,44 nas soleiras de 18 e 24 cm e para um Froude de 6,98 para a soleira de 24 cm. Para evitar este acontecimento é necessário que o nível acima da soleira (Y_3) seja maior que a altura crítica, onde se estabeleceram as seguintes equações:

$$Y_3 - h_c > 0 \quad (50)$$

$$Y_3 = Y_2 - s \quad (51)$$

Com as equações acima determinou-se a altura limite para que não se provoque este tipo de escoamento indesejado. A tabela seguinte demonstra os resultados que limitam o aparecimento deste tipo de escoamento.

Tabela 4.4 – Alturas adimensionalizadas limite.

Fr	q (m³/s/m)	hc (m)	Y₂ (m)	Y₁ (m)	s_{limite} (m)	s_{lim}/Y₁
7,44	0,04	0,100063	0,265	0,026	0,16	6,34
6,98	0,06	0,131120	0,339	0,036	0,21	5,77
6,91	0,08	0,158841	0,409	0,044	0,25	5,69
6,34	0,10	0,184318	0,459	0,054	0,27	5,09
5,98	0,11	0,196410	0,478	0,060	0,28	4,69

No entanto, elaborou outra tabela onde está presente a relação de s/Y_1 que forneceu a menor flutuação a montante da soleira e a relação adotada para depois obter o gráfico da figura 4.31, que revela a altura ideal considerando as flutuações a montante da soleira para que as flutuações sejam mínimas e não ocorra o escoamento do tipo Weir Flow.

Tabela 4.5 - Alturas adimensionalizadas utilizadas.

F₁	Y₁ (m)	s_{limite} (m)	s_{lim}/Y₁	s/Y₁ *	s/Y₁ 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).

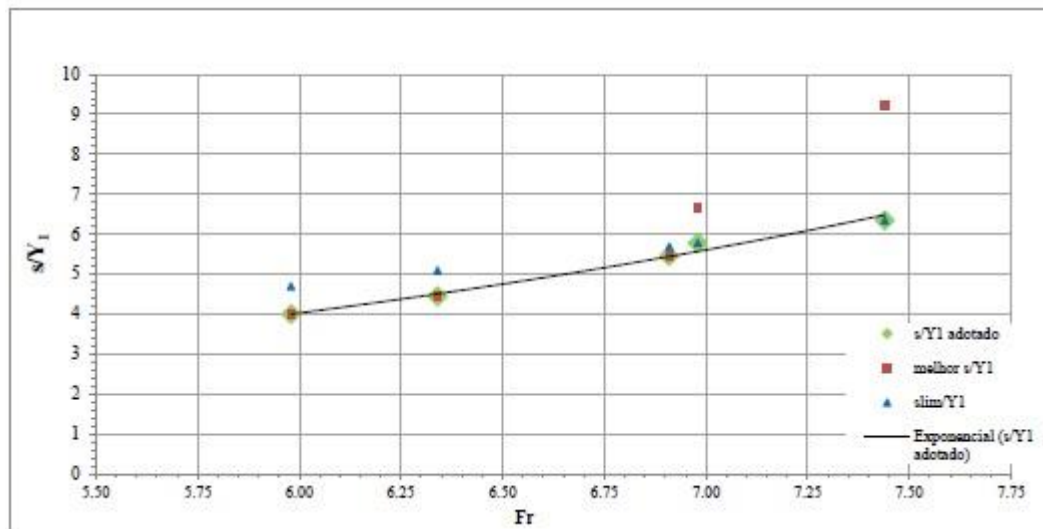


Figura 4.31 - Altura ideal considerando as flutuações a montante da soleira para que as flutuações sejam mínimas e não ocorra escoamento tipo Weir Flow (Conterato, 2014).

A figura 4.32 resume todas as informações obtidas para determinar a melhor altura de soleira adimensionalizada na bacia de dissipação em função do número de Froude, segundo Conterato (2014). Porém, o presente estudo veio mostrar um pequeno desenvolvimento naquilo que se considera como zona admissível para a altura da soleira, conforme está indicado na figura 4.33.

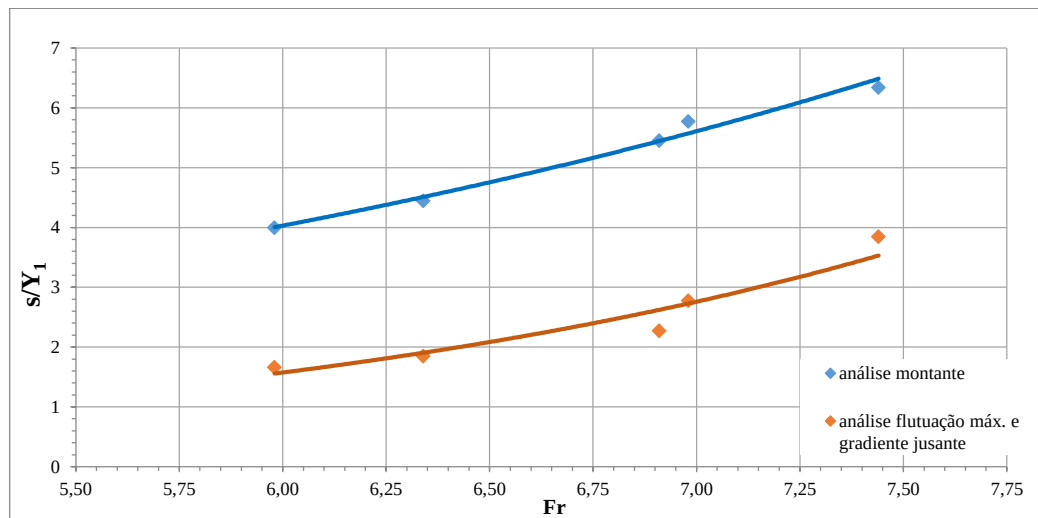


Figura 4.32 - Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude. (Conterato, 2014)

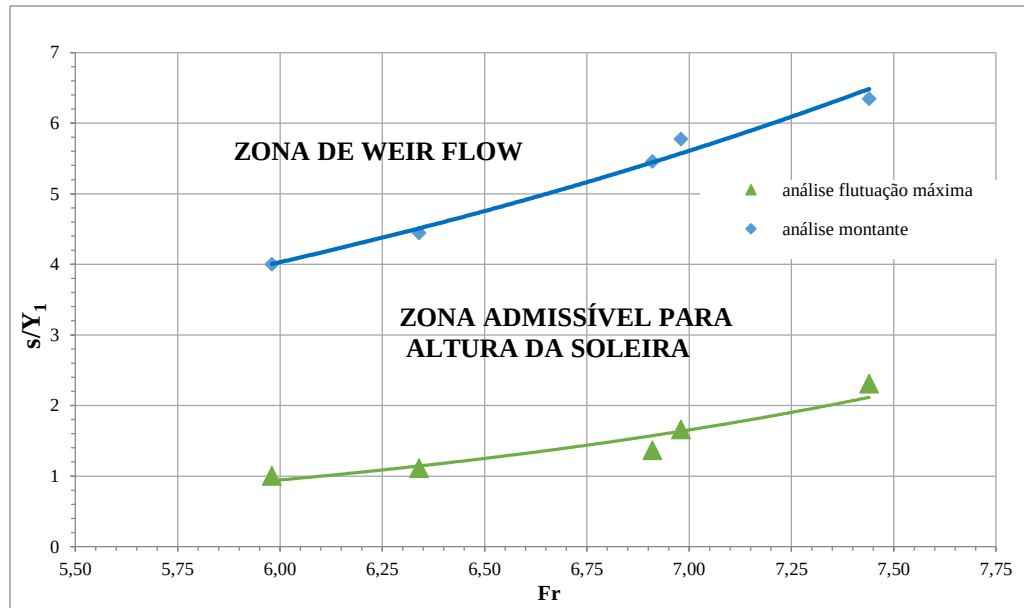


Figura 4. 33 - Altura ideal da soleira terminal em função do número de Froude.

As figuras anteriores demonstram duas linhas, uma linha superior que resultou da análise de flutuação a montante, onde se definiu a altura adimensionalizada limite para evitar o tipo de escoamento “Weir Flow”, que ocorria quando altura crítica surgia sobre a soleira e uma linha inferior decorrente da análise de flutuação máxima e do parâmetro ϖ a jusante da soleira terminal. Como já foi referido no capítulo 4.2.4, nesta pesquisa foram encontrados valores máximos de flutuação menores para a soleira de 6 cm, o que contribuiu para que essa linha inferior aumentasse essa zona admissível para altura da soleira. É recomendável que a altura adotada seja superior à linha inferior e não supere a linha superior.

No que toca à posição ideal da soleira terminal, não surgiu nenhuma alteração ao já demonstrado por Conterato (2014), uma vez que a posição que apresentou os menores valores do parâmetro ϖ , na soleira em estudo, para as várias vazões utilizadas foi a posição 1/2H. Essa informação está presente na figura 4.34.

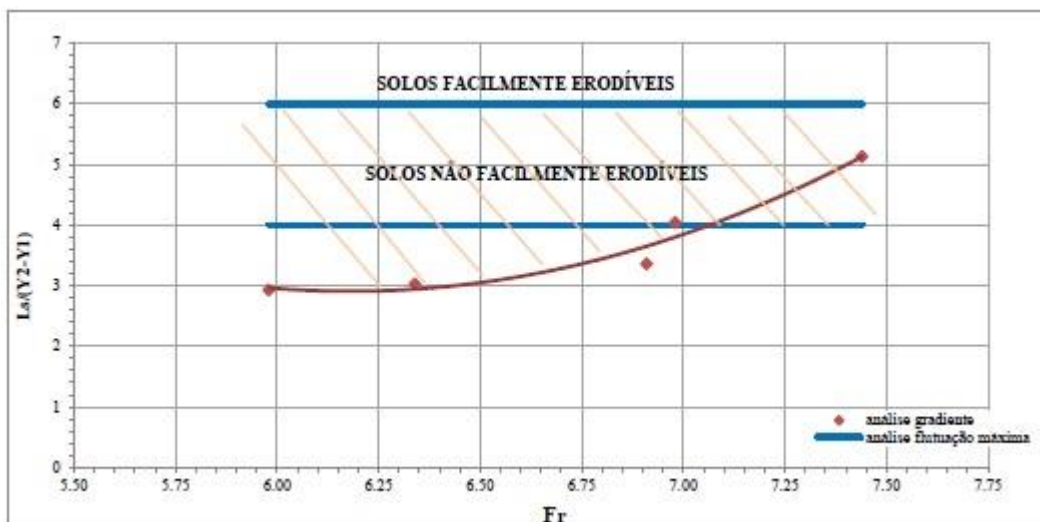


Figura 4.34 - Posição ideal da soleira terminal em função do número de Froude (Conterato, 2014).

No gráfico acima, a reta superior com a posição adimensionalizada de 6,0 (Y_2-Y_1) corresponde ao limite mínimo do comprimento da bacia recomendado para solos facilmente erodíveis. Já a reta inferior de 4,0 (Y_2-Y_1) corresponde ao limite mínimo do comprimento da bacia recomendado para solos não facilmente erodíveis. Analisando a figura 4.34 verifica-se que para números de Froude menores que 7,10 se poderia utilizar bacias mais curtas, no entanto não é aconselhável.

4.3. COMPARAÇÃO DE DIFERENTES INCLINAÇÕES DE SOLEIRA

4.3.1. PRESSÕES MÉDIAS BRUTAS

Terminada a análise referente à soleira terminal de 6 cm de altura de inclinação 1:1, procedeu-se ao estudo de uma soleira com a mesma altura, porém com uma inclinação 1:3. As posições testadas foram exatamente as mesmas utilizadas anteriormente.

A figura 4.35 representa a distribuição de pressões médias brutas ao longo da bacia de dissipação para um caudal de 80L/s para a posição 1/1H. Para a altura de 6 cm, a mudança de inclinação não altera de forma muito significativa as distribuições de pressão

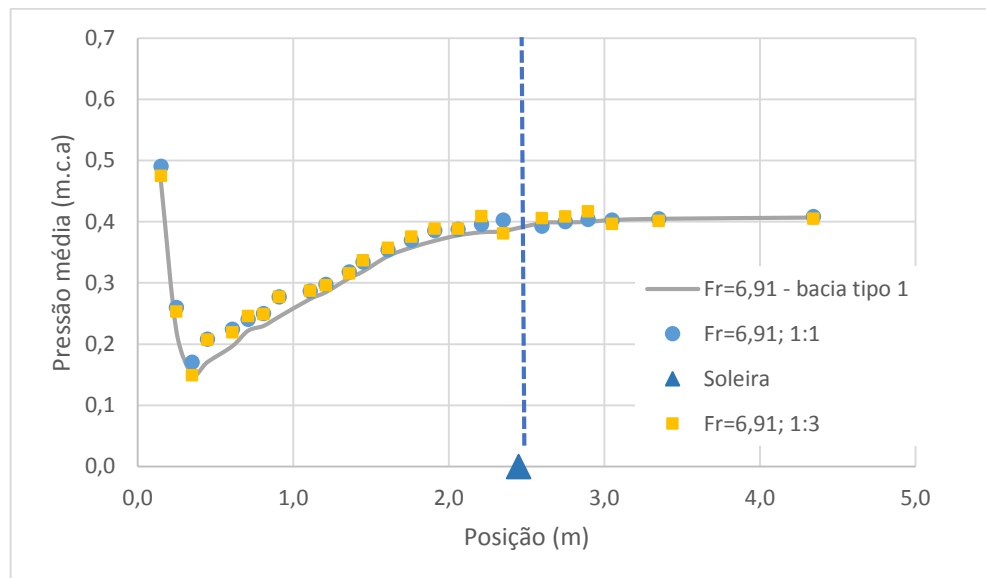


Figura 4.35 - Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 80L/s e posição 1/1H com inclinações diferentes.

Todavia, essa diferença é mais notória caso se esteja perante uma vazão maior e a soleira se situe mais próxima do descarregador, caso da figura 4.36 que é apresentada em maior pormenor na figura 4.37. Os dados registados no último transdutor a montante da soleira terminal são bastante diferentes, uma vez que para a soleira de inclinação 1:3, esta se situa por cima de um transdutor, sendo que o seu valor de pressão não é fidedigno, provocando essa grande discrepância de valores. Todos os demais registos encontram-se no ANEXO II.

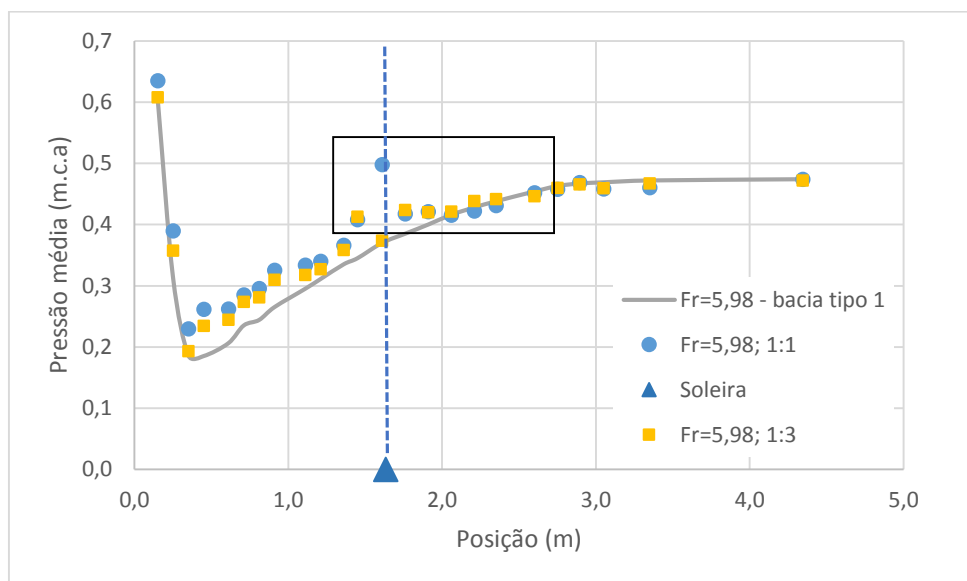


Figura 4.36 - Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 110L/s e posição 2/3H com inclinações diferentes.

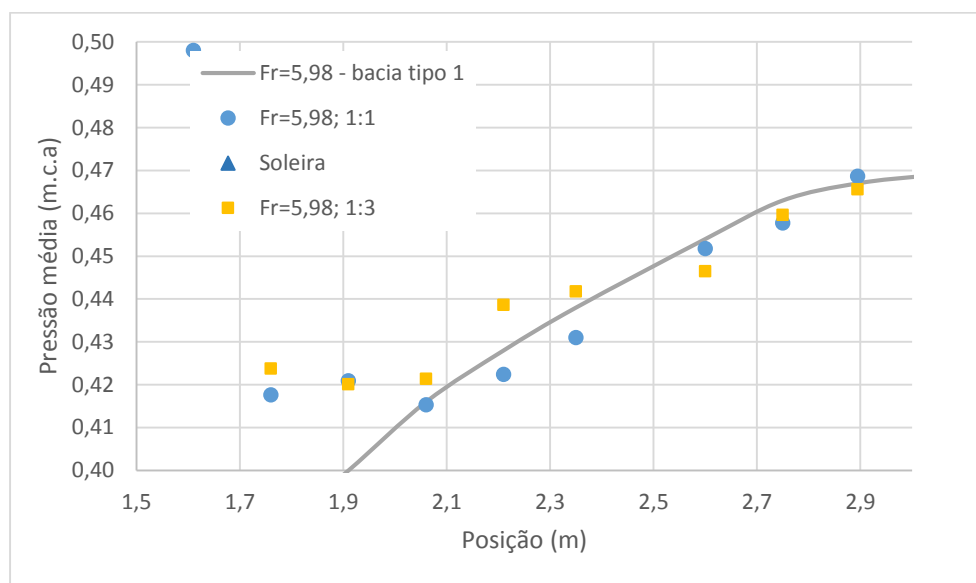


Figura 4.37- Comparação de pressões médias brutas para um caudal de 110L/s e posição 2/3H com inclinações diferentes com maior detalhe a jusante da soleira.

As pressões observadas a jusante da soleira terminal para a inclinação 1:1 são ligeiramente menores que as da inclinação 1:3. Esta diferença deve-se ao fato da soleira com inclinação maior (1:1) projetar o escoamento mais para jusante comparativamente com a soleira de inclinação menor (1:3), criando uma zona de recirculação maior, registrando-se assim pressões menores. Mais a jusante os valores de pressão são praticamente coincidentes.

4.3.2. PRESSÕES MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS

Da mesma forma que se adimensionalizaram os dados pelo método proposto por Marques (1997) para se compararem os valores de pressão variando a altura, o mesmo foi feito agora variando a inclinação para a altura de 6 cm. A figura 4.38 representa a comparação de pressões médias adimensionalizadas para um caudal de 80L/s ($Fr=6,91$) na posição $2/3H$ para as duas inclinações utilizadas. Os restantes gráficos estão inseridos no anexo II.

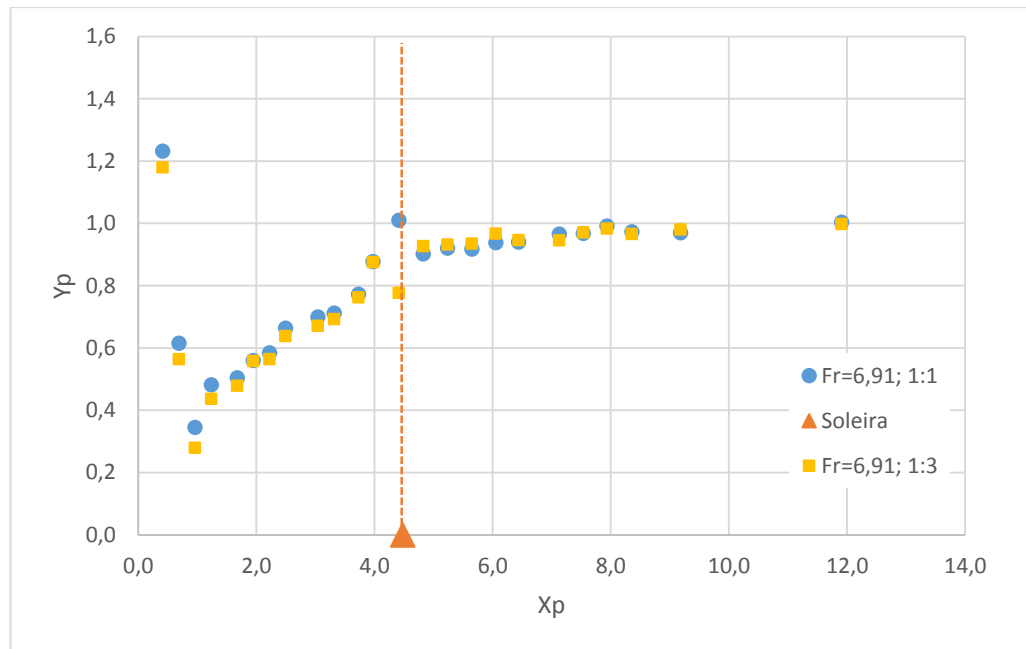


Figura 4.38 - Comparação de pressões médias adimensionalizadas para um caudal de 80L/s e posição $2/3H$ com inclinações diferentes.

Analisando e comparando todas as vazões e todas as posições das soleiras, verificou-se que a mudança de inclinação tem influência na distribuição de pressões na bacia de dissipação, embora não de forma tão significativa para a altura em questão (6cm), todavia, essa influência poderá ser mais significativa para soleiras de alturas maiores.

4.3.3. FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO

Como já foi verificado anteriormente a colocação de soleiras terminais numa bacia de dissipação tem influência na flutuação de pressões, onde se concluiu que, a jusante da soleira, a flutuação tende a diminuir com o aumento da altura da soleira.

Sendo a soleira utilizada nesta investigação a de menor altura, 6 cm, é de esperar que a mudança de inclinação não seja tão significativa caso se comparasse inclinações para soleiras maiores. A figura 4.39 revela que as flutuações de pressão são praticamente as mesmas quando se altera a inclinação da soleira para 6cm de altura.

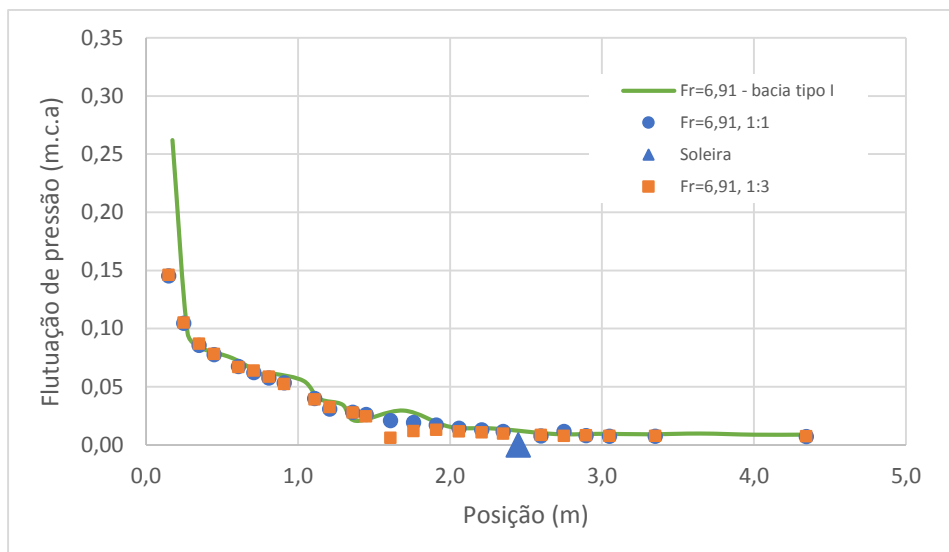


Figura 4.39 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão para as soleiras de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

Porém ao analisar-se em pormenor os diversos caudais e as diferentes posições, é possível retirar algumas conclusões. Para a maior parte dos caudais, verificou-se que as flutuações a montante da soleira terminal para uma inclinação de 1:1 são menores do que para uma inclinação de 1:3 e que esta diferença se acentuava à medida que a soleira se aproxima do descarregador. Considere-se o exemplo das figuras 4.40 e 4.41, para o mesmo caudal, 110L/s, verifica-se que há uma diferença de flutuação maior a montante da soleira terminal na figura 4.40 do que na figura 4.41.

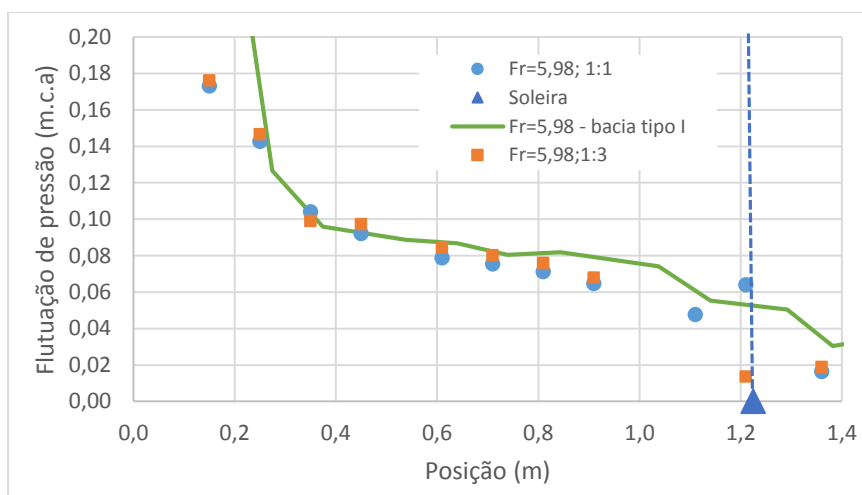


Figura 4.40 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a montante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/2H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).

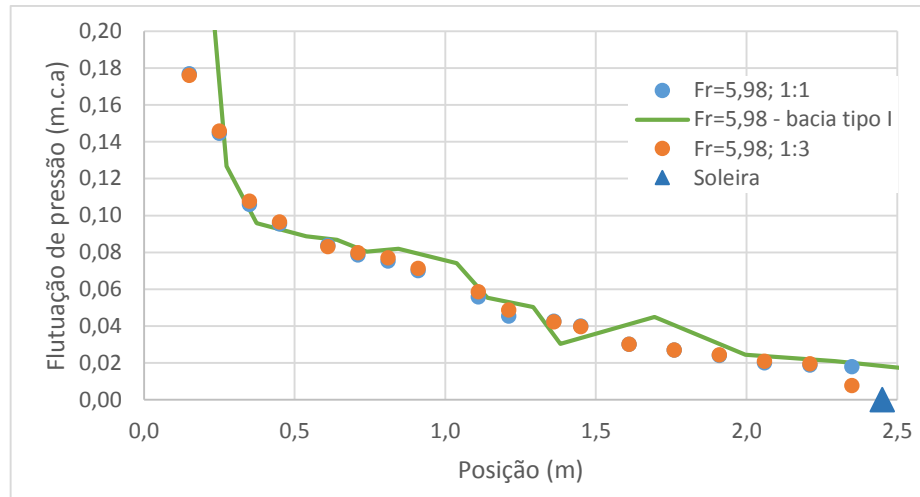


Figura 4.41 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a montante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$)

Já a jusante, a flutuação é menor nos primeiros transdutores a jusante da soleira para uma inclinação de 1:1 devido à já referida recirculação. No primeiro transdutor a jusante da soleira terminal em que se regista uma flutuação superior na inclinação 1:1 comparativamente a 1:3 acredita-se que este seja um ponto próximo do ponto de incidência do jato. As figuras 4.42 e 4.43 representam a distribuição longitudinal das flutuações de pressão a jusante da soleira para a posição 1/2H e 1/1H, respetivamente.

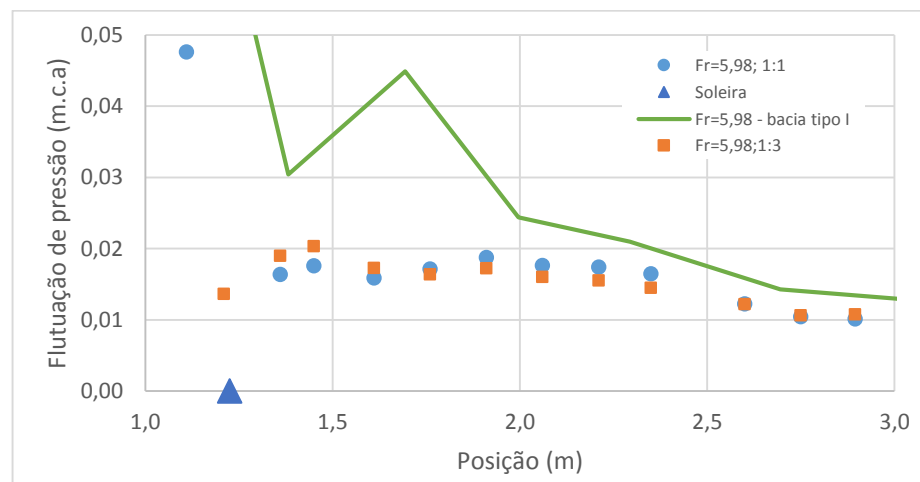


Figura 4.42 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a jusante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/2H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).

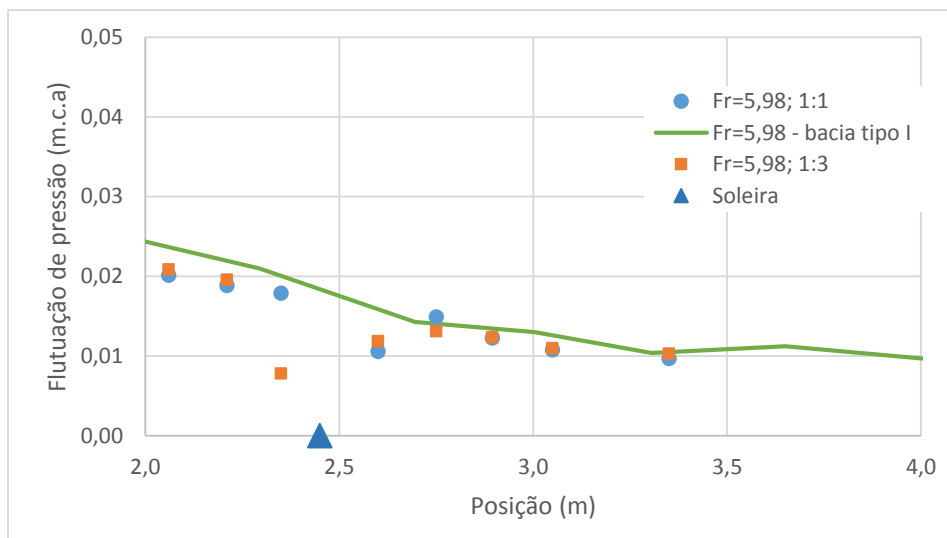


Figura 4.43 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão a jusante da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 1/1H, para uma vazão de 110L/s ($Fr=5,98$).

O método utilizado em 4.2.2 para adimensionalizar os valores de flutuação foi igualmente empregue neste caso, como ilustra a figura 4.44.

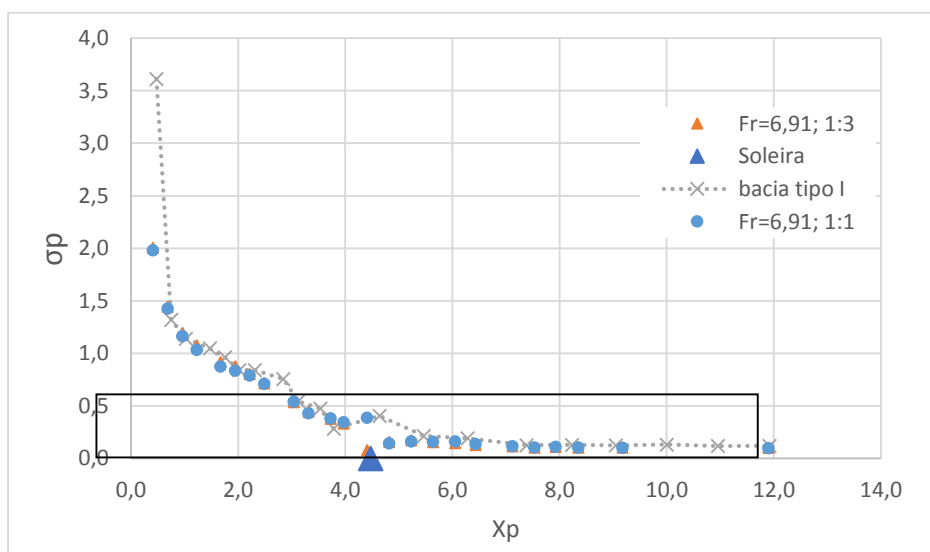


Figura 4.44 - Distribuição longitudinal de flutuações de pressão adimensionalizadas da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

Já na figura 4.45 está apresentado em pormenor a distribuição longitudinal das flutuações de pressão adimensionalizadas da soleira de 6 cm de alturas para as duas inclinações estudadas para uma dada posição e um dado caudal. A figura 4.46 é uma foto que ilustra o escoamentos para as condições referidas anteriormente.

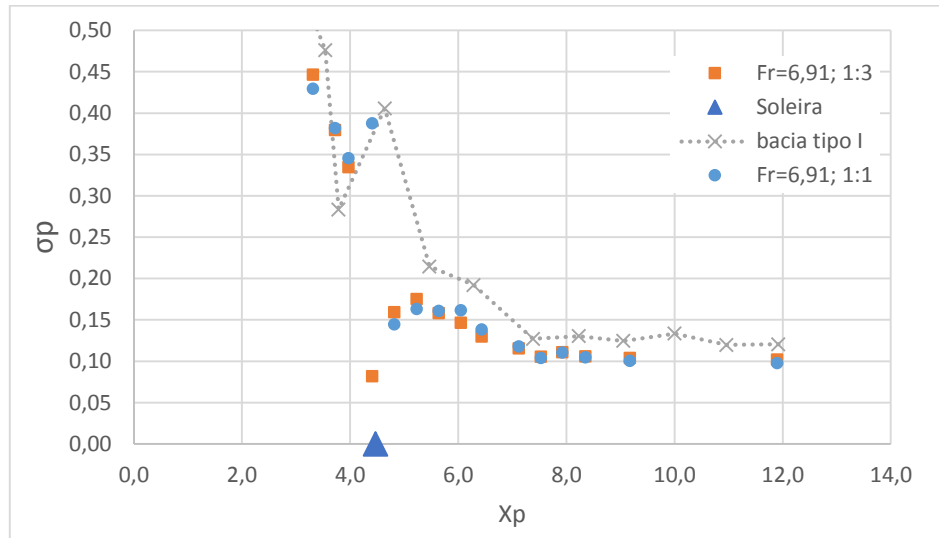


Figura 4.45 - Pormenor da distribuição longitudinal de flutuações de pressão adimensionalizadas da soleira de 6 cm de altura e inclinações de 1:1 e 1:3, na posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

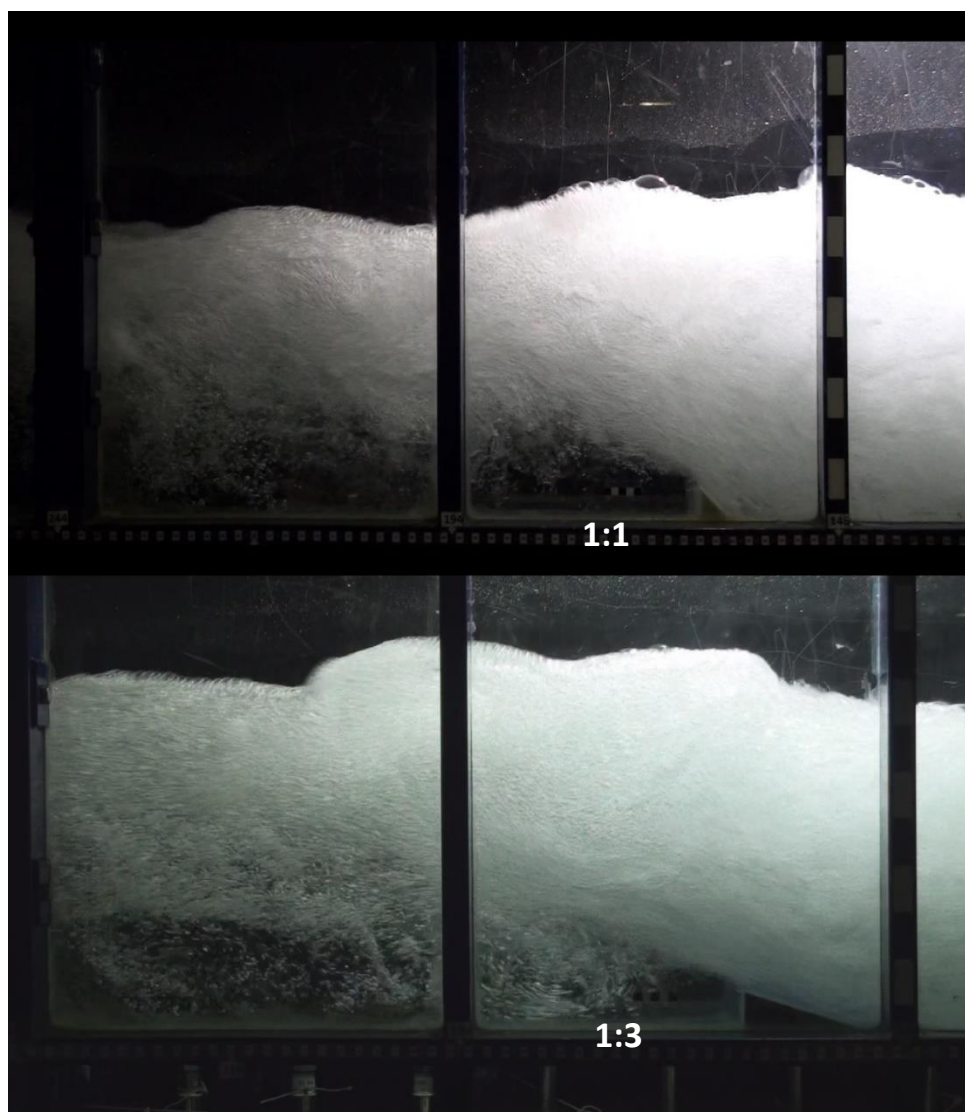


Figura 4.46 - Fotos do escoamento para uma soleira de 6 cm de altura de inclinação de 1:1 e 1:3, na posição 2/3H, para uma vazão de 80L/s ($Fr=6,91$).

4.3.4. ANÁLISE DO PARÂMETRO ω

No que respeita à relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre (parâmetro ω), concluiu-se que a diminuição da altura da soleira terminal não contribuía para a melhoria do comportamento, relativamente à soleira utilizada no estudo (10 cm). Alterando a inclinação da soleira terminal, observar-se-á se sucede o mesmo.

De modo a fazer uma crítica construtiva sobre esta mudança de inclinação, utilizaram-se os gráficos já apresentados em 4.2.3 e adicionaram-se os dados obtidos dos ensaios desta nova soleira. Um exemplo desse gráfico está demonstrado na figura 4.47 e em detalhe na figura 4,48, os restantes gráficos encontram-se no ANEXO IX.

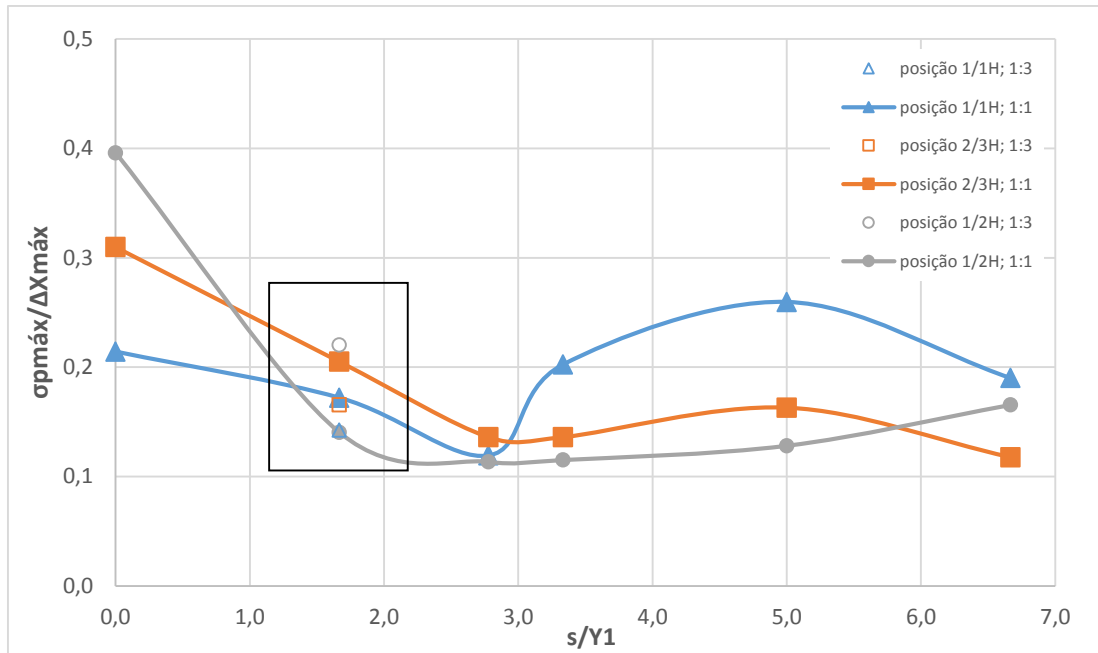


Figura 4.47 - Resultados do parâmetro σ em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$) e comparação de inclinações para a soleira de 6 cm.

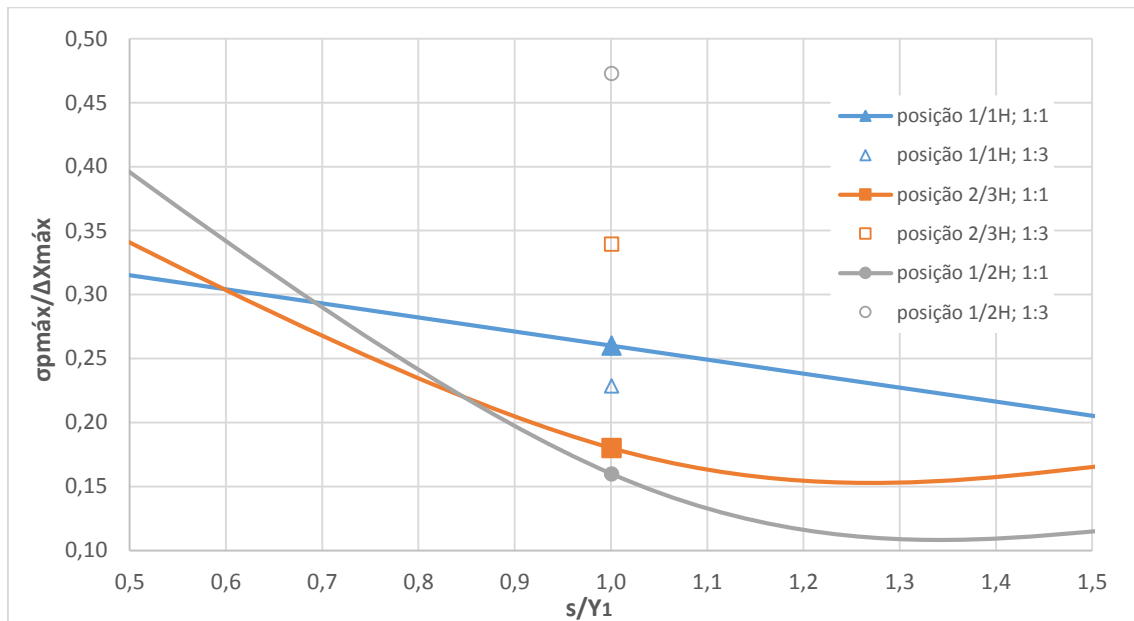


Figura 4.48 – Pormenor dos resultados do parâmetro σ em função da altura adimensionalizada da soleira para diferentes posições, para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$) e comparação de inclinações para a soleira de 6 cm.

Analisadas todas as vazões concluiu-se que alterando a inclinação para 1:3 ($18,41^\circ$), para a posição 1/1H, obteve-se sempre um menor valor de relação entre flutuação máxima adimensionalizada após soleira e distância adimensionalizada desde a soleira até ao ponto onde essa flutuação ocorre comparativamente com a inclinação 1:1. O mesmo não se pode afirmar das restantes posições. Para a posição 2/3H a utilização desta nova inclinação só revelou ser vantajosa para as vazões mais baixas, para a mais elevada (110L/s; $Fr=5,98$), essa relação registada foi superior à obtida anteriormente para a

inclinação de 1:1. Relativamente à posição 1/2H, apenas para a vazão de 40L/s se mostrou benéfica a aplicação desta nova inclinação, todas as restantes vazões apresentaram valores dessas relações superiores.

Embora a inclinação de 1:3 na soleira de 6 cm de altura tenha apresentado resultados mais favoráveis relativos aos valores dessas relações para algumas vazões e posições comparativamente com a soleira anteriormente testada, nenhum destas novas relações foi considerado um valor mínimo, tendo esses valores sido obtidos para a soleira de 10 cm de altura e de inclinação 1:1.

Tendo-se alcançado melhores valores dessas relações neste estudo de diferente inclinação, pressupõe-se que, eventualmente, uma alteração de inclinação na soleira de 10 cm poderá atingir valores mínimos ainda menores.

As figuras 4.49; 4.50 e 4.51 mostram os resultados de cada parâmetro ϖ , variando a inclinação (0° (bacia do tipo I); $18,43^\circ$ (1:3) e 45° (1:1)), o número de Froude, para cada posição, 1/1H; 2/3H e 1/2H, respetivamente.

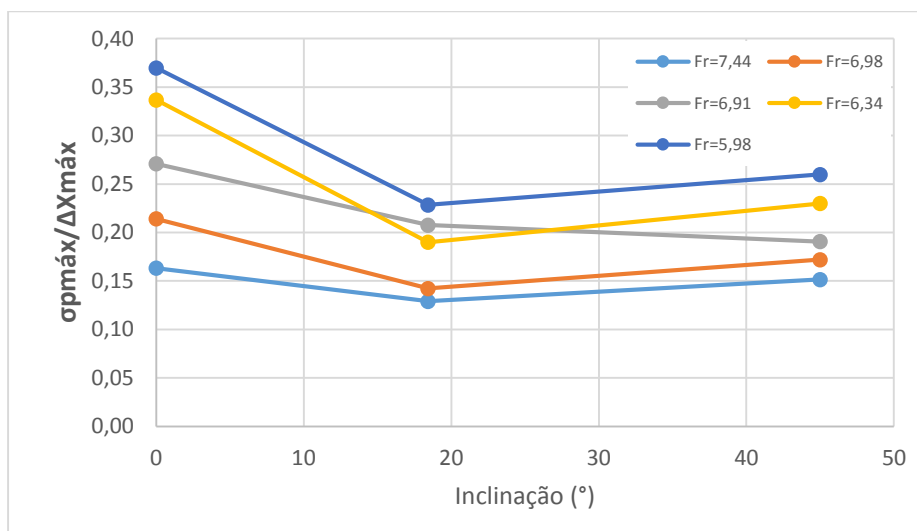


Figura 4.49 – Resultados do parâmetro ϖ variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/1H.

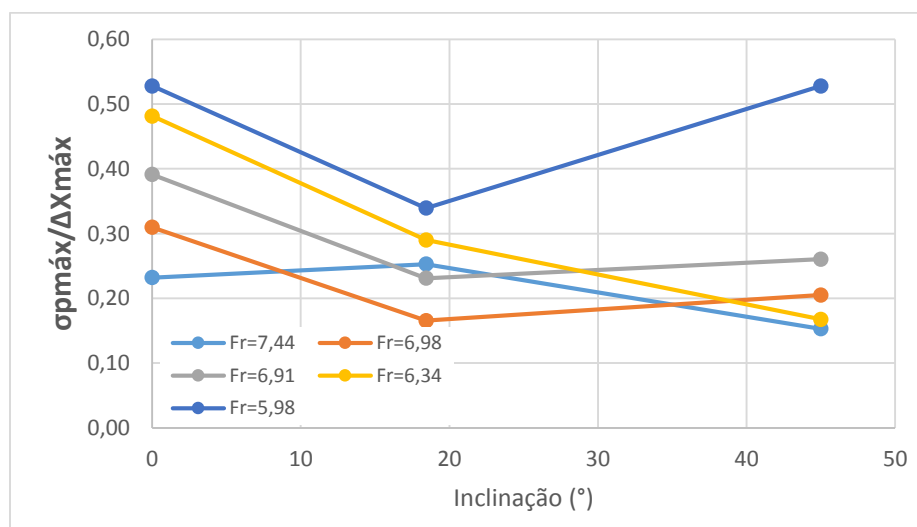


Figura 4.50 - Resultados do parâmetro ϖ variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 2/3H.

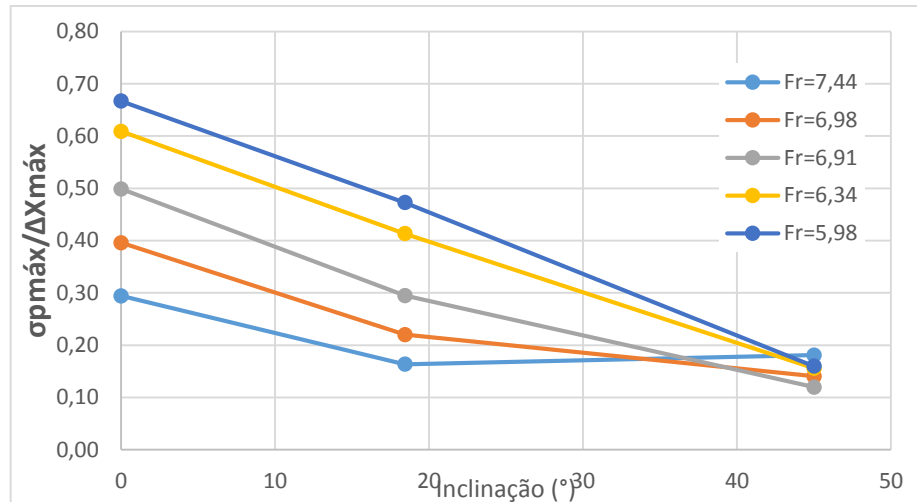


Figura 4.51 - Resultados do parâmetro σ variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/2H.

Analisando estes três gráficos podemos retirar as seguintes conclusões relativamente à inclinação:

- Para a posição 1/1H, todas as vazões apresentaram melhores resultados para uma inclinação menor (1:3; 18,43°), embora pouco significativos;
- À medida que a soleira terminal se aproxima do descarregador, a soleira de 1:1 tende a ter melhores resultados, sendo a soleira de 1:3 mais vantajosa apenas para baixas vazões;
- A introdução de soleira terminal é essencial, como já era esperado.

4.3.5 MÁXIMO VALOR DE FLUTUAÇÃO A JUSANTE DE UMA SOLEIRA TERMINAL

Esta análise é exatamente igual à efetuada em 4.2.4, só que neste subcapítulo juntaram-se os resultados obtidos para uma soleira terminal de inclinação 1:3. A figura 4.52 demonstra esses resultados para uma vazão de 100L/s, onde os caracteres preenchidos são correspondentes aos resultados obtidos por Conterato (2014) e os caracteres não preenchidos são os do presente estudo. A figura 4.53 é uma aproximação da figura anterior, que pretende mostrar em detalhe a diferença entre os resultados das inclinações utilizadas.

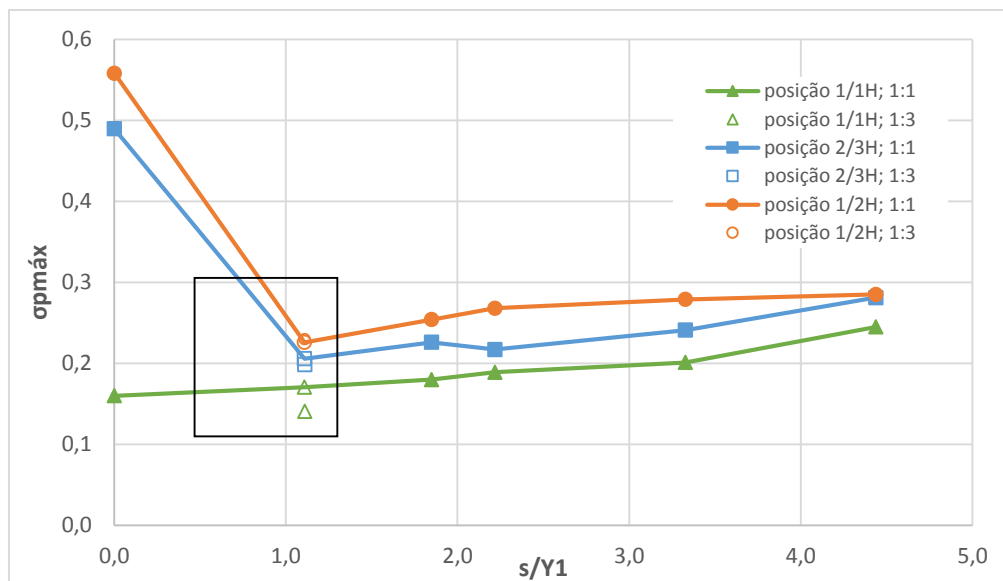


Figura 4.52 – Resultados dos máximos valores de flutuação a jusante de uma soleira terminal para diferentes inclinações e posições para uma vazão de 100L/s ($Fr=6,34$).

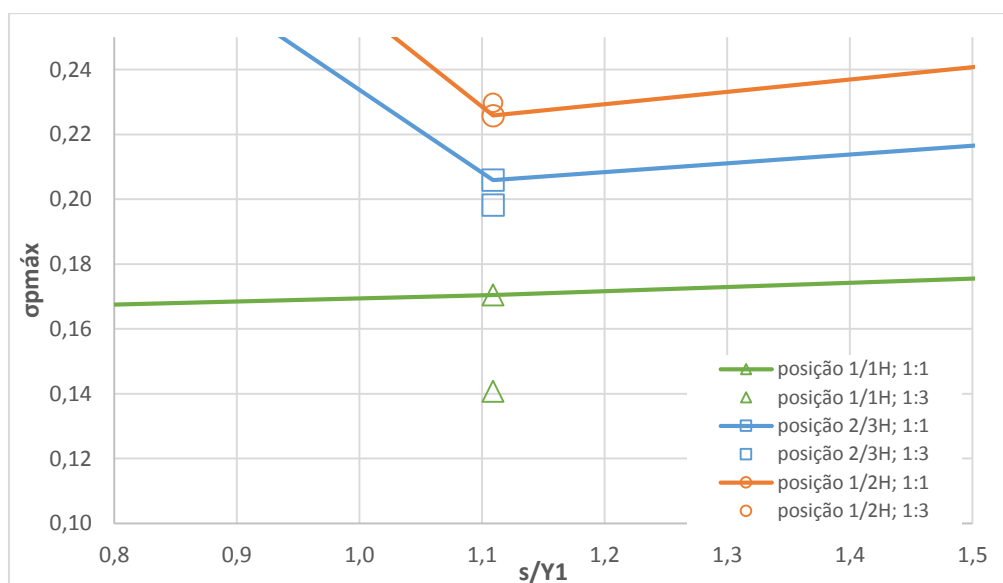


Figura 4.53 – Detalhe dos resultados dos máximos valores de flutuação a jusante de uma soleira terminal para diferentes inclinações e posições para uma vazão de 100L/s ($Fr=6,34$).

Foi então feito o mesmo tipo de análise que havia sido feita no capítulo anterior, tendo como objetivo perceber como mudava esta variação de pressão perante uma alteração de inclinação. As figuras seguintes mostram esses resultados para as várias posições e no casos em que se considerou oportuno, uma aproximação em detalhe. É importante referir que na figura 4.54, para a situação do número de Froude igual a 6,91 (80L/s), a flutuação máxima obtida para a inclinação 1:3 não foi a prevista, já que se esperava que a flutuação fosse menor. Admite-se que possa ter havido um erro no ensaio por uma má leitura de dados por parte do transdutor, mas só repetindo o mesmo para poder ter a certeza de tal acontecimento, no entanto, por falta de tempo, não foi possível fazer essa confirmação.

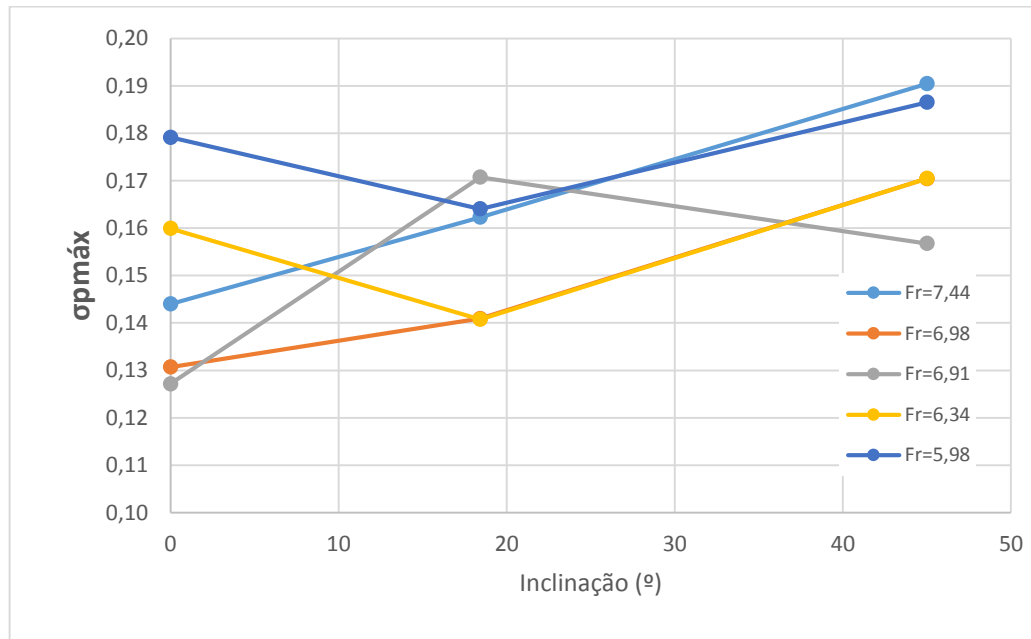


Figura 4.54 – Resultados dos máximos valores de flutuação, variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/1H.

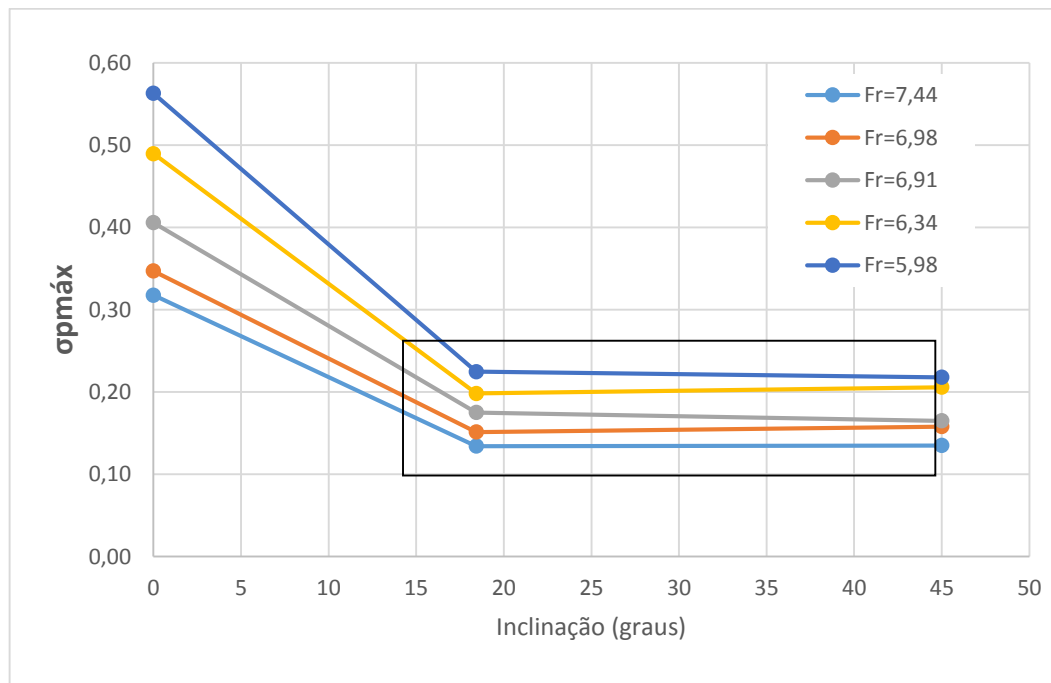


Figura 4.55 – Resultados dos máximos valores de flutuação, variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 2/3H.

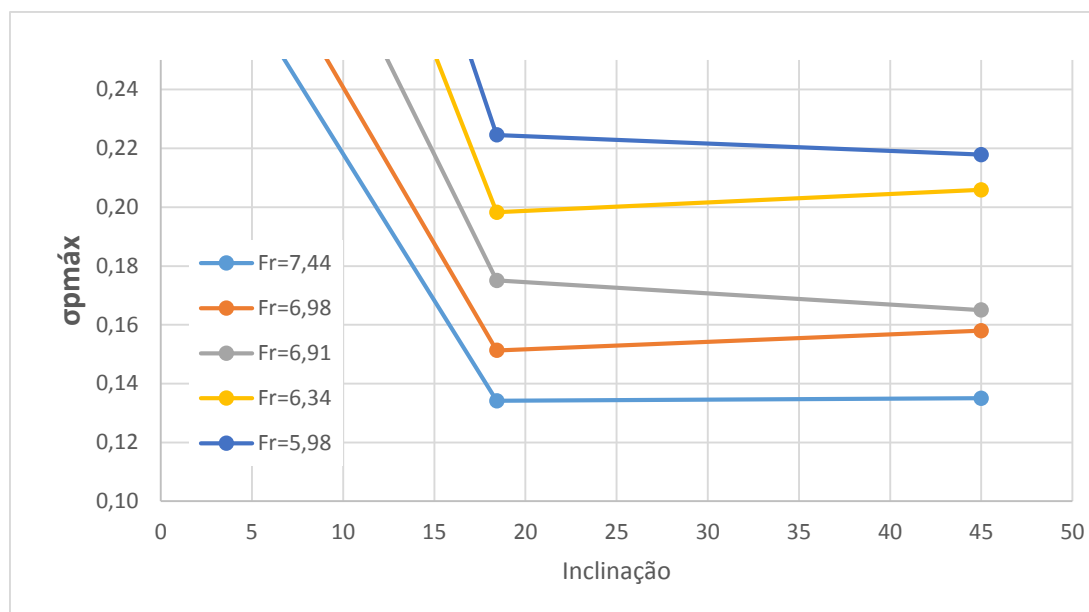


Figura 4.56 – Detalhe dos resultados dos máximos valores de flutuação, variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 2/3H.

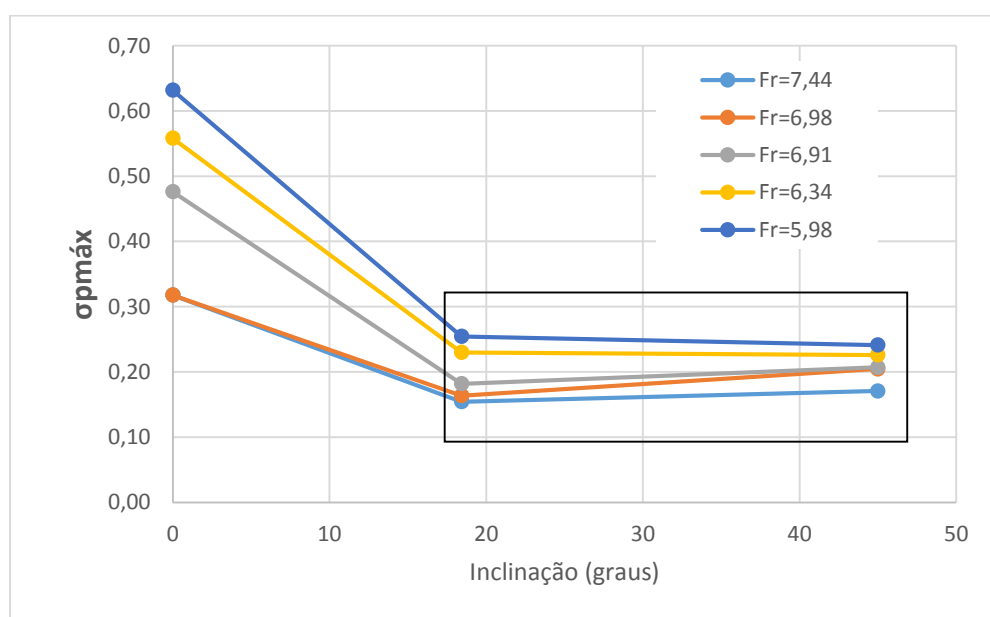


Figura 4.57 - Resultados dos máximos valores de flutuação, variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/2H.

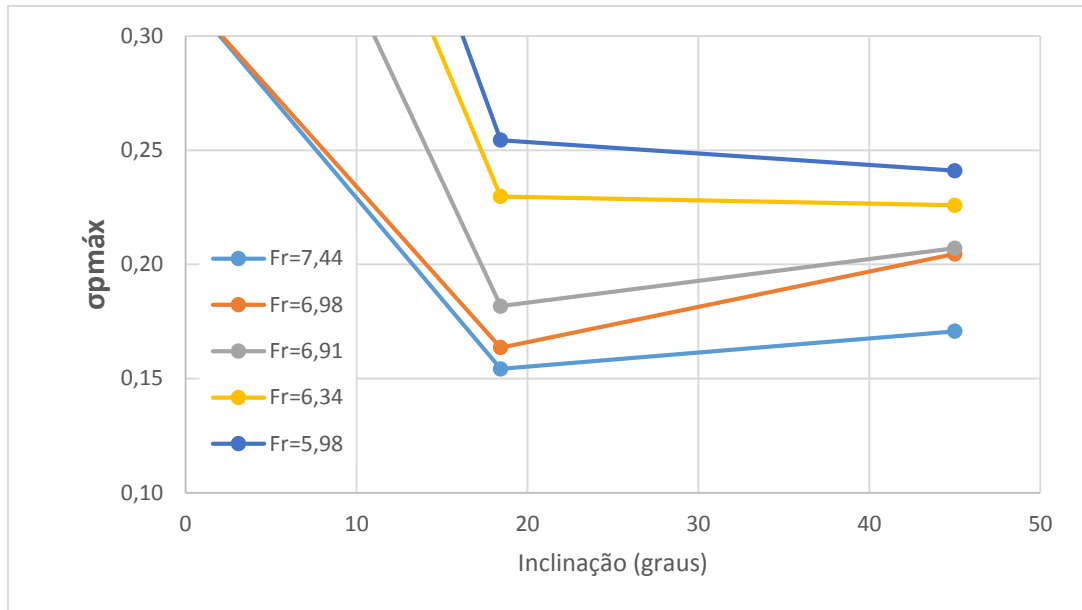


Figura 4.58 - Detalhe dos resultados dos máximos valores de flutuação, variando a inclinação para cada número de Froude, para a posição 1/2H.

Analizados os resultados referentes às variações máximas de pressão, pôde concluir-se algo idêntico ao que já se tinha concluído relativamente ao parâmetro ω :

- Na posição mais distante do descarregador (1/1H) é onde a utilização de uma inclinação menor é mais favorável;
- Assim que a soleira terminal se aproxima do descarregador, a utilização de uma inclinação menor deixa de ser tão vantajosa;
- A soleira terminal é fundamental para reduzir as variações de flutuação de pressão.

5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÕES

As principais conclusões que se puderam retirar deste estudo foram:

a) Relativamente à altura da soleira:

- A altura da soleira utilizada deve ser escolhida em função do número de Froude na entrada da bacia de dissipação;
- É aconselhável a inclusão de uma soleira terminal nas bacias de dissipação sempre;
- No que respeita ao parâmetro ϖ , a altura utilizada corroborou o estudo desenvolvido anteriormente por Conterato (2014), que indica como inclinação ideal 1:1 e altura da soleira em função do número de Froude.
- No que respeita à máxima flutuação de pressão, a altura utilizada veio apresentar melhores resultados que as soleiras utilizadas por Conterato (2014).

Portanto recomenda-se adotar alturas de soleira entre $1 \leq s/Y_1 \leq 2$ apresentadas na figura 4.29.

b) Relativamente à posição da soleira:

- Não se obtiveram melhores resultados com a soleira deste estudo, o que vem a confirmar o estudo feito por Conterato (2014). Portanto recomenda-se a adotar os comprimentos da bacia conforme apresentados na figura 4.34.

c) Relativamente à inclinação:

- A utilização de uma inclinação menor traz melhores resultados para posições mais distantes do descarregador (1/1H), embora pouco significativos.
- Nas posições mais próximas do descarregador (2/3H e 1/2H) a diminuição da inclinação para 1:3 só se revelou vantajosa para escoamentos com maiores números de Froude (menores vazões), sendo mais prudente utilizar a inclinação 1:1 para $L < 6,0 (Y_2 - Y_1)$.

5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De maneira a poder aperfeiçoar o conhecimento sobre a melhor altura, posição e inclinação da soleira terminal a utilizar na bacia de dissipação sugere-se que os estudos sejam complementados com outro tipo de análises:

a) Análise de pressões médias e flutuações:

- Análise do comportamento das pressões médias e das flutuações para uma soleira terminal com altura adimensional (s/Y_1) entre 1 e 6,5, mas com maior detalhe entre 1 e 2.
- Análise do comportamento das pressões médias e das flutuações para uma soleira terminal com uma inclinação entre 0 (bacia do tipo I) e 1:1 (45°), dando ênfase para uma inclinação 1:2 (26,57°).
- Análise do comportamento das pressões médias e flutuações para as posições adimensionalizadas entre 2 e 6, no entanto com maior detalhe entre 3 e 5.

b) Análise de velocidade no fundo da bacia a jusante da soleira terminal (com PIV) (onde não tem ar)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BINDO, M.; GAUTIER, J.; LACROIX, F. *The stepped spilway of M'Bali dam*. *Water Power & Dam Construction*, p. 35-36, 1993.
- 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.
- CARVALHO, E. *apontamentos de Aproveitamentos Hidráulicos e Obras Fluviais*. Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013.
- CHANSON, H. *Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes*. *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Delft, v. 32, n. 2, p. 213-435, 1994.
- CHANSON, H. *Hydraulics of Skimming flow over stepped channels and spillways*. *Journal of Hydraulic Research*. IAHR, Delft, v. 32, n. 3, p. 445-460. 1994a.
- CHANSON, H. *Hydraulics of Open Channel Flow*, 2003
- CHANSON, H. *Hydraulics of Stepped Spillways: current status*. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, v. 126, n. 9, p. 636-637, 2000.
- CHANSON, H. *Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators: dam engineering*, Brisbane: University of Queensland, 2001.
- CHOW, *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 1959
- CONTERATO, E. *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.
- CONTERATO, E. *Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014
- DAI PRÁ, M. *Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H*. 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, 2004.
- DAI PRÁ, M. *Uma Abordagem para Determinação das Pressões Junto ao Fundo de Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico*. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2011
- ELEVATORSKI, A. E. *Hydraulic Energy Dissipators*, 1959. McGraw-Hill: New York.
- FIGUEIREDO, N. *Dissipação de energia a jusante de um descarregador não convencional*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010.

- HAGER, W. H. *Energy dissipators and hydraulic jump*. Water Science and Technology Library. Kluwer Academic Publishers, 1992.
- 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*”. XVII CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 1997. Guayaquil, Equador.
- 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.
- MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. C. *Descarregadores de cheias em degraus: posição actual da avaliação da dissipação de energia*. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS. 1995a, Recife. ABRH, v.4, p. 65-71, 1995.
- MEES, A. A. A. *Caracterização das Solicitações Hidrodinâmicas em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico com Baixo Número de Froude*. 2008. 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 Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- ORTIZ, J. P. *Macroturbulência de escoamento a jusante de estruturas de dissipação por ressalto*, 1982.
- PETERKA, A. J. *Hydraulic Desing of Stilling Basins and Energy Dissipators..* Washington, U. S. Govt. Print. Off. 1957
- PINHEIRO, A. A. N. *Acções 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.
- PIRESTANI, M. R.; RAZMKHAH, A.; GHOBADI, F. *Effect of convergent walls on energy dissipation in stilling basin by physical modeling*. International Jounal of Thermal and Fluid Sciences. v. 1, p. 1-10, 2012.
- RAJARATNAM, N. *Hydraulic jump. Advances in Hydrosience*. v. 4, por Chow, V. T. (ED), 1967. Academic Press: New York.
- RAJARATNAM, N. *Skimming Flow in stepped spillways*. Journal of Hydraulic Engineering. v.
- SANAGIOTTO, D. *Características do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade $1V:0,75H$* . 2003. 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. *Considerações sobre a Hidráulica de Vertedores em Degraus: Metodologias Adimensionais para Pré – Dimensionamento*. 2008. Dissertação (mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos.

SIMÕES, A.; PORTO, R. M.; SCHULZ, E. H. *Uma síntese acerca de estudos em hidráulica da canais e vertedouros em degraus*. XVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2009. Campo Grande, Brasil. **Anais...** Campo Grande. ABRH, 2009.

SORENSEN, R. M. *Stepped spillways hydraulic model investigation*. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, v. 111, n. 12, p. 1461-1472. December, 1985.

SOUSA, P. *Estudo da dissipação de energia por ressalto hidráulico a jusante de descarregadores não convencionais*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2011.

TEIXEIRA, E.D. *Previsão dos valores de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico*. 2003. . 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.

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.

TOZZI, M. J.; Brighetti, g. *Vertedouros em degraus – posição de início de aeração do escoamento*. XVI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA, 1994. Santiago, Chile. **Anais...** Santiago. IAHR, 1994.

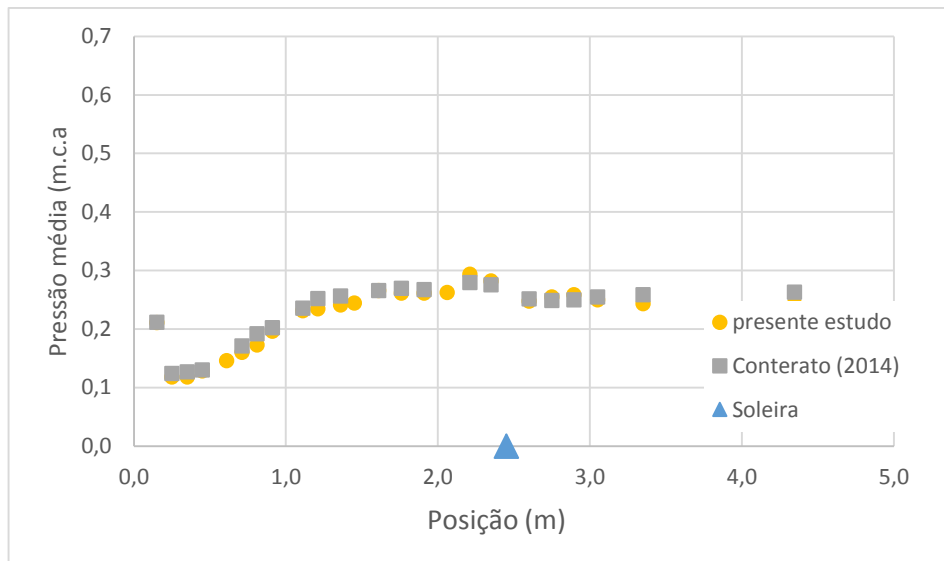
U.S. BUREAU OF RECLAMATION. *Design of Small Dams*, Water Resources Technical Publication. 1987. 860p.

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

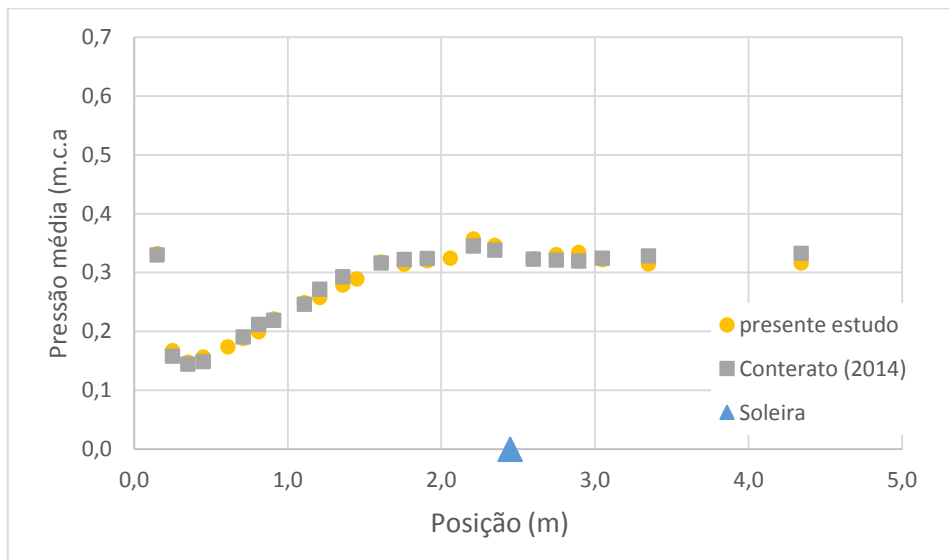
ANEXOS

ANEXO I

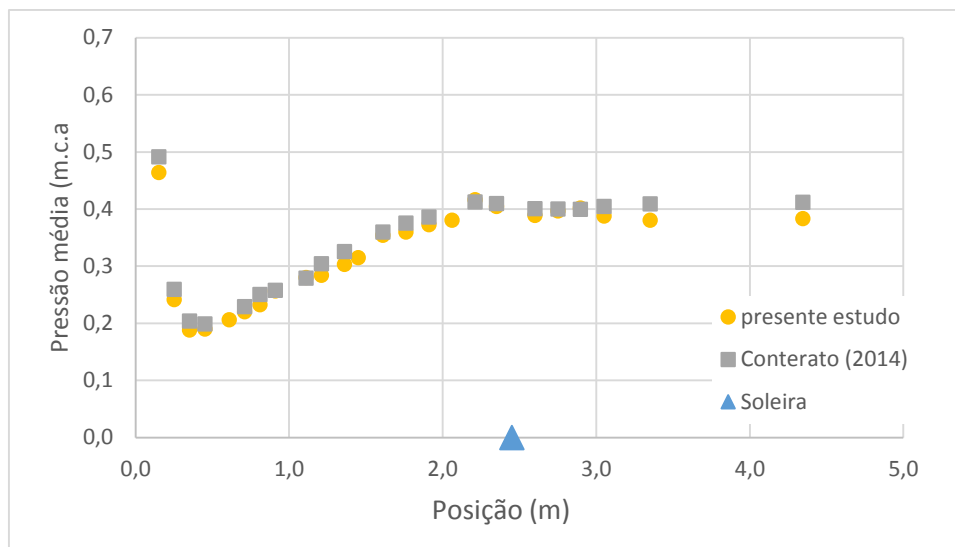
COMPARAÇÃO DE ESTUDOS DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES MÉDIAS BRUTAS



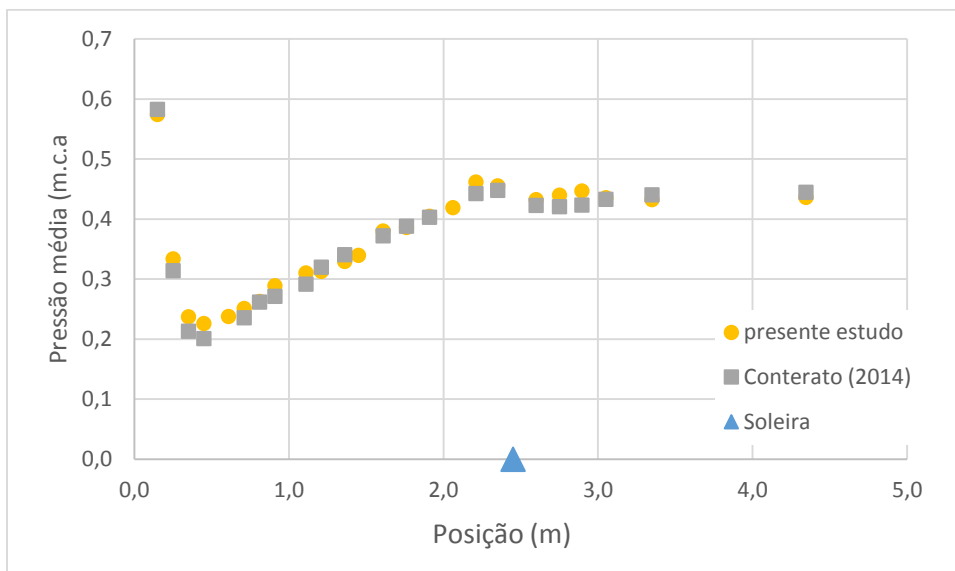
Dados dos dois estudos de soleira com 10 cm de altura, para 40L/s e posição 1/1H



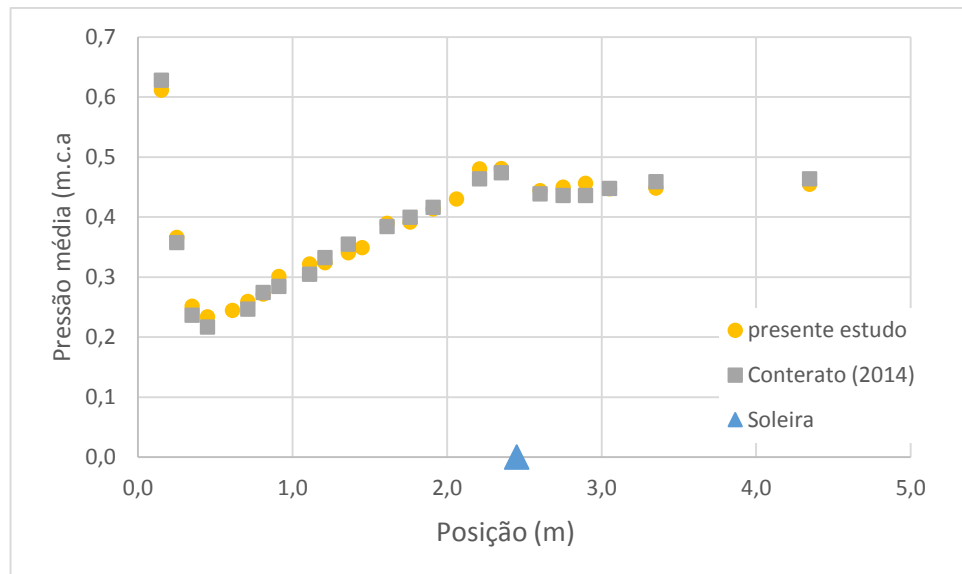
Dados dos dois estudos de soleira com 10 cm de altura, para 60L/s e posição 1/1H



Dados dos dois estudos de soleira com 10 cm de altura, para 80L/s e posição 1/1H



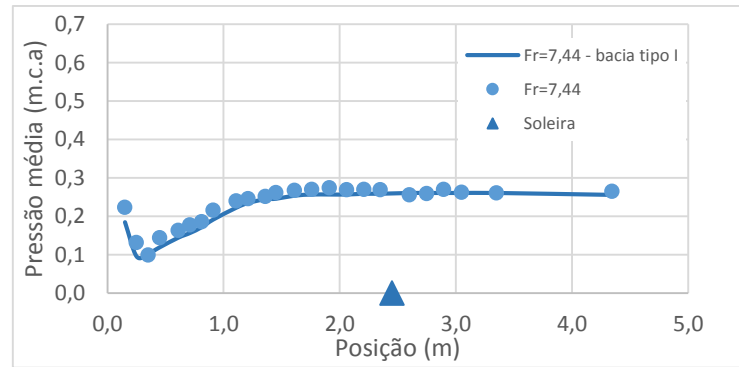
Dados dos dois estudos de soleira com 10 cm de altura, para 100L/s e posição 1/1H



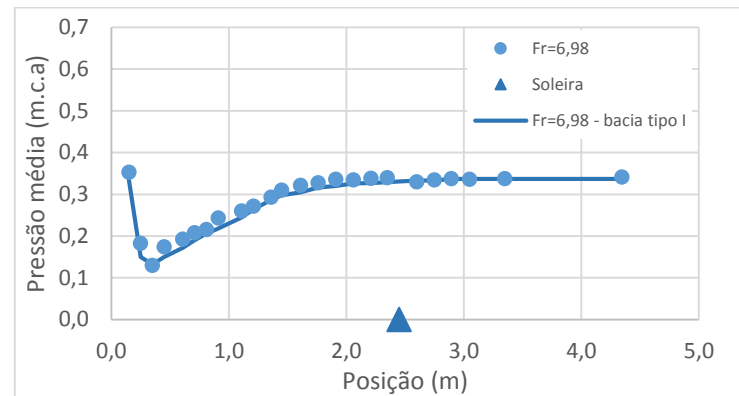
Dados dos dois estudos de soleira com 10 cm de altura, para 110L/s e posição 1/1H

ANEXO II

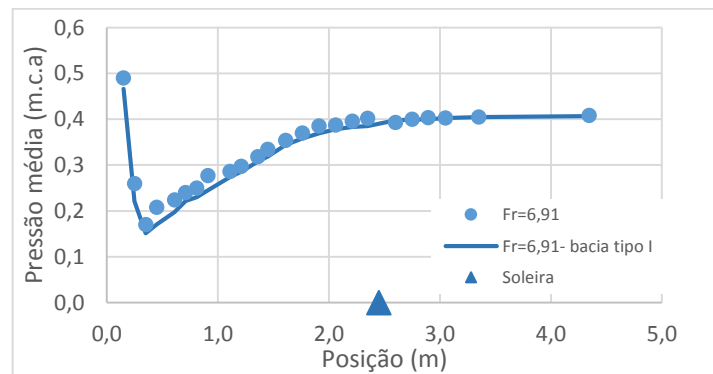
DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES MÉDIAS BRUTAS EM COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EM BACIA DO TIPO I



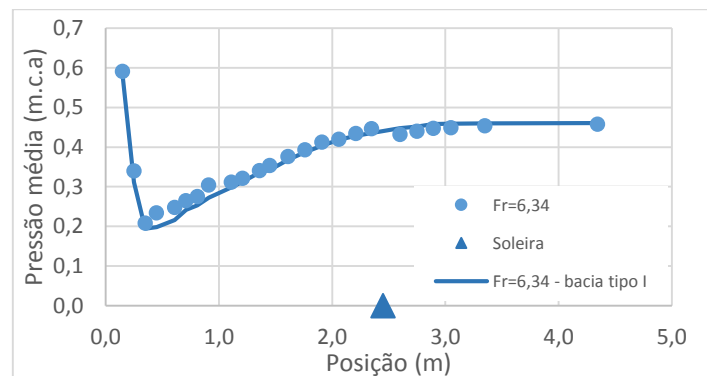
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:1$, $Fr=7,44$



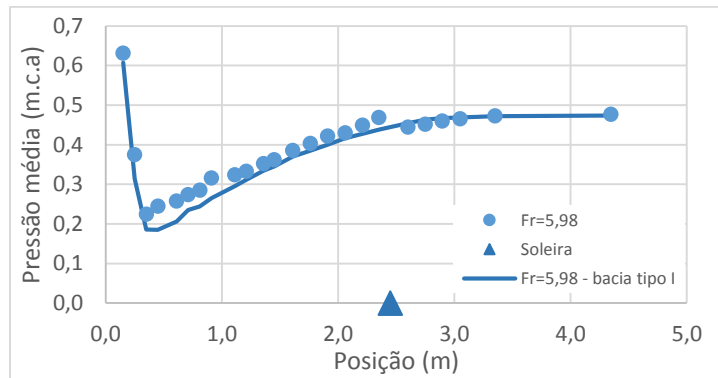
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,98$



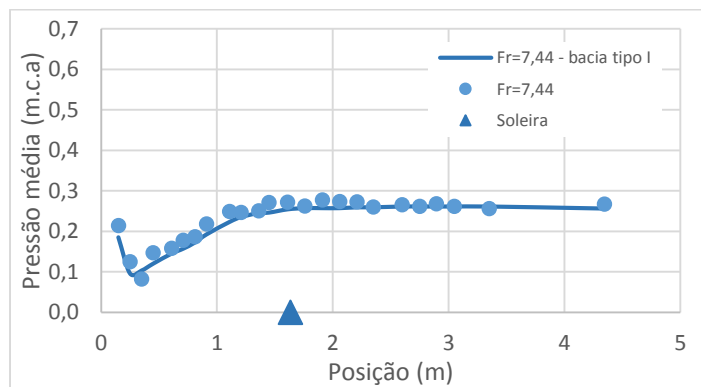
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,91$



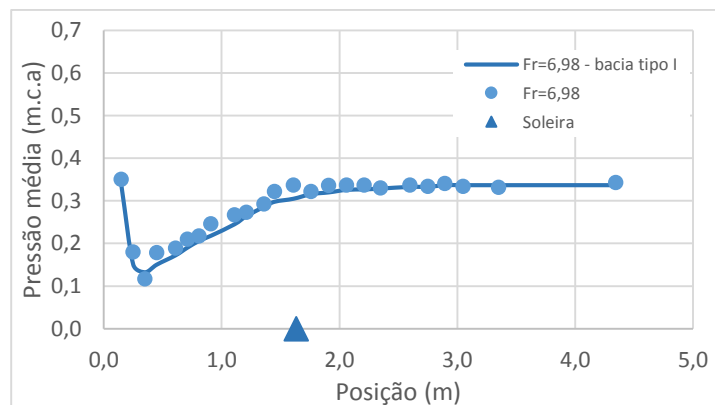
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,34$



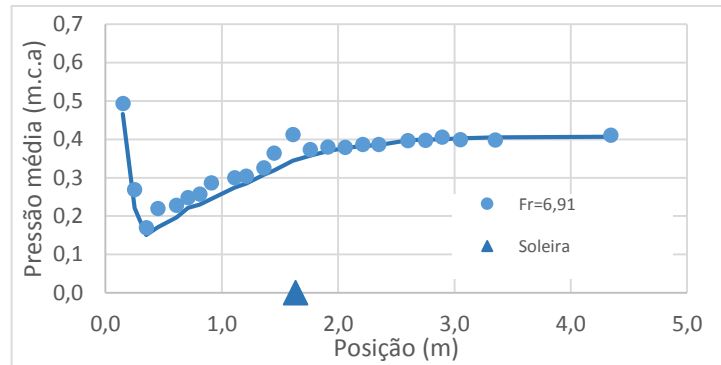
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=5,98$



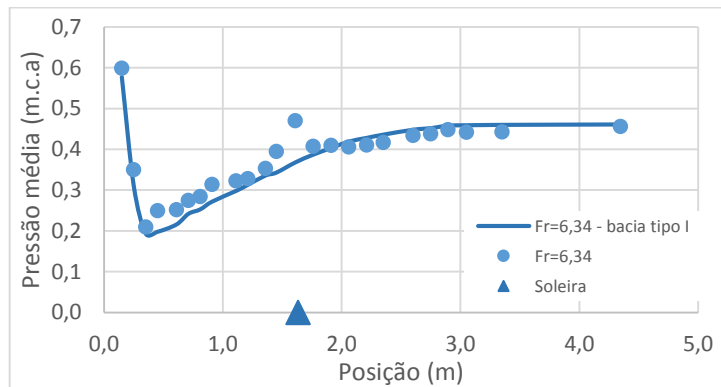
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:1, $Fr=7,44$



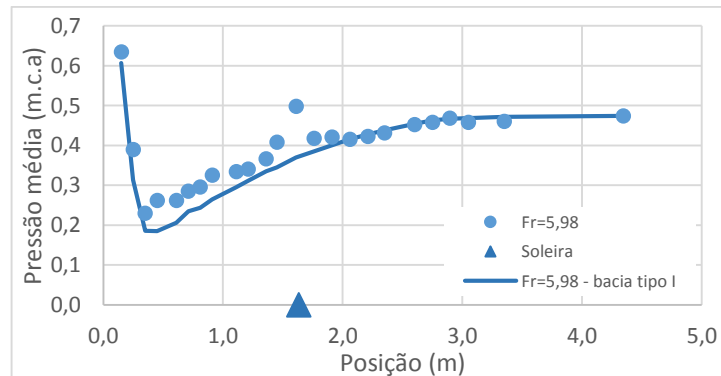
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:1, $Fr=6,98$



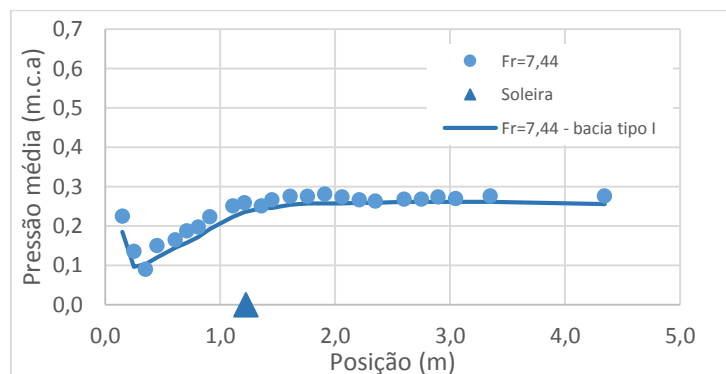
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:1, $Fr=6,91$



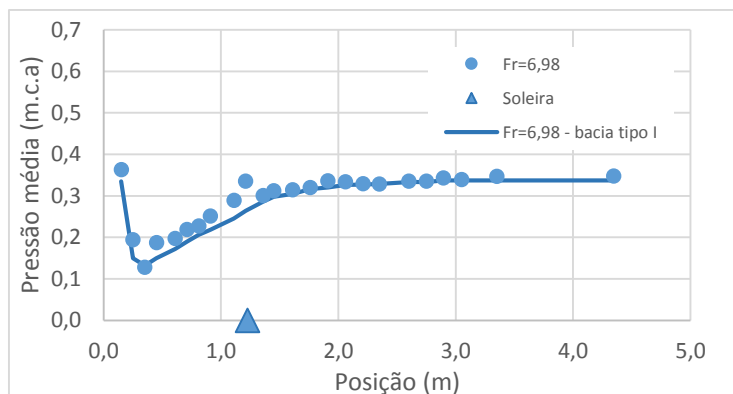
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:1, $Fr=6,34$



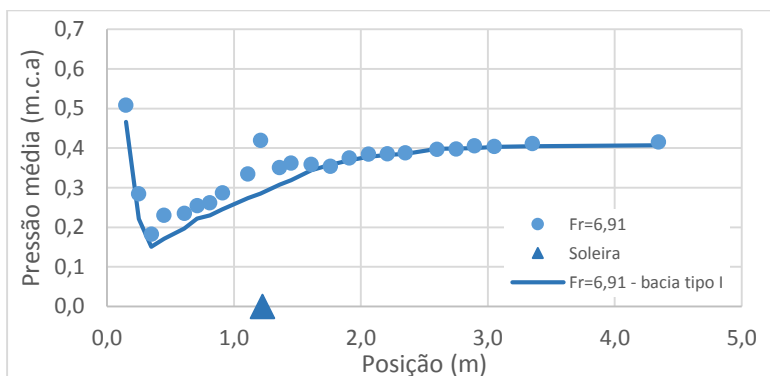
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:1, $Fr=5,98$



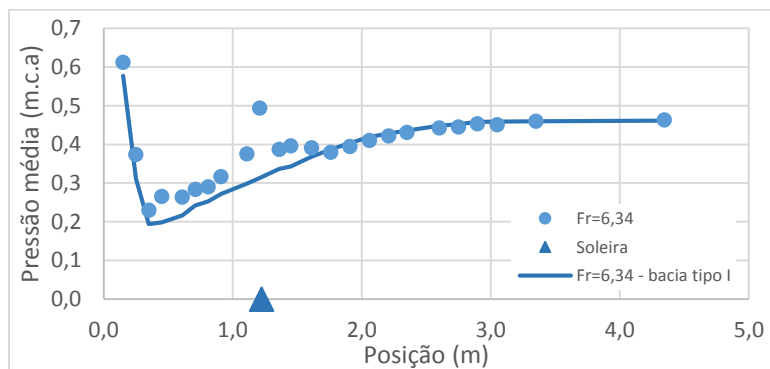
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=7,44$



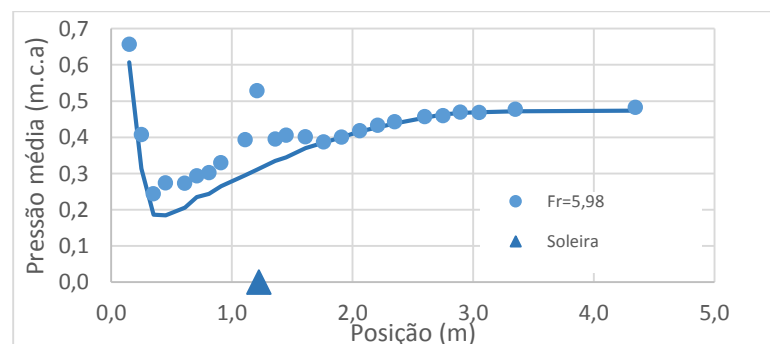
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=6,98$



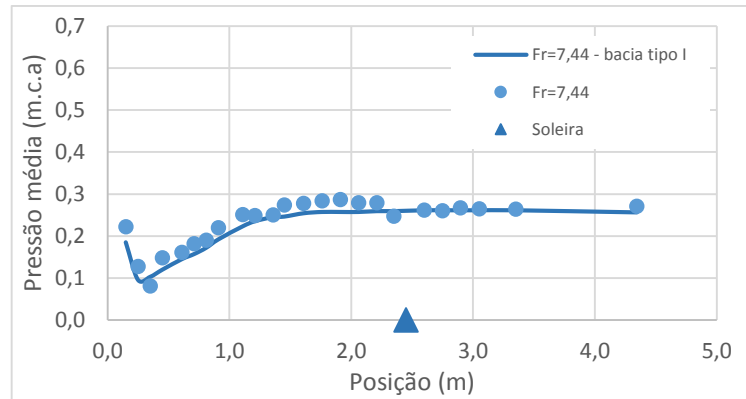
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=6,91$



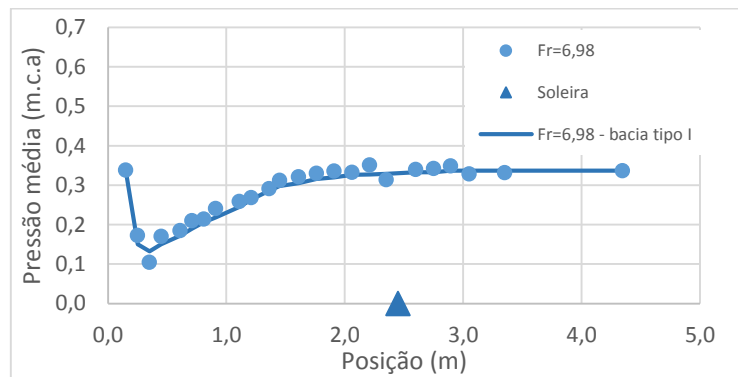
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=6,34$



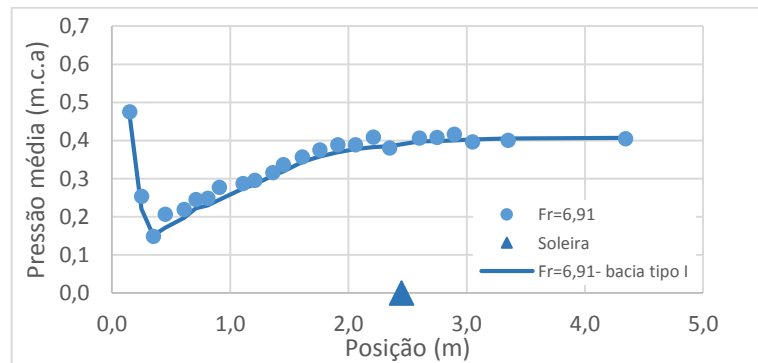
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=5,98$



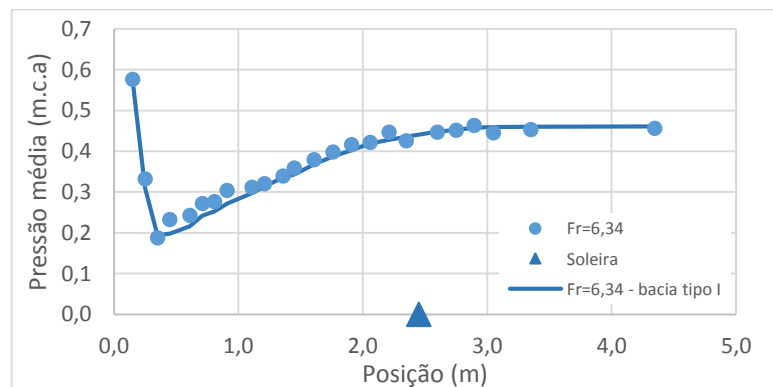
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=7,44$



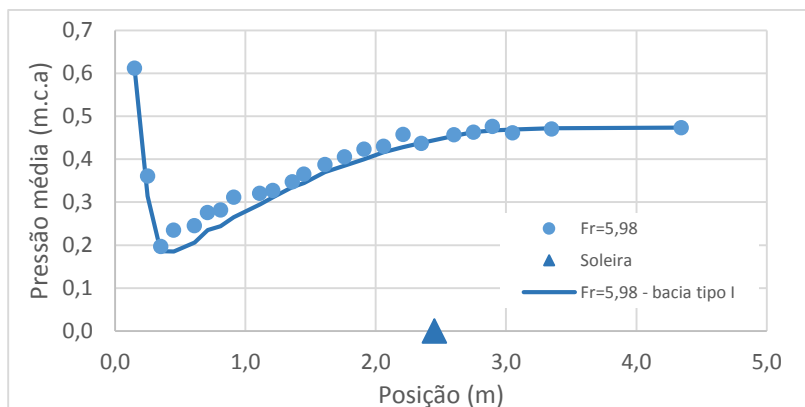
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,98$



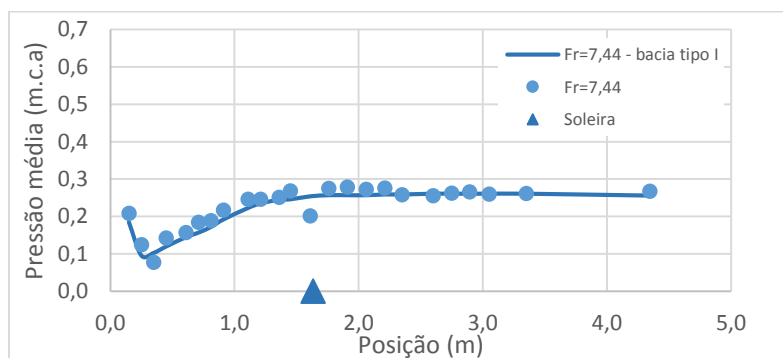
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,91$



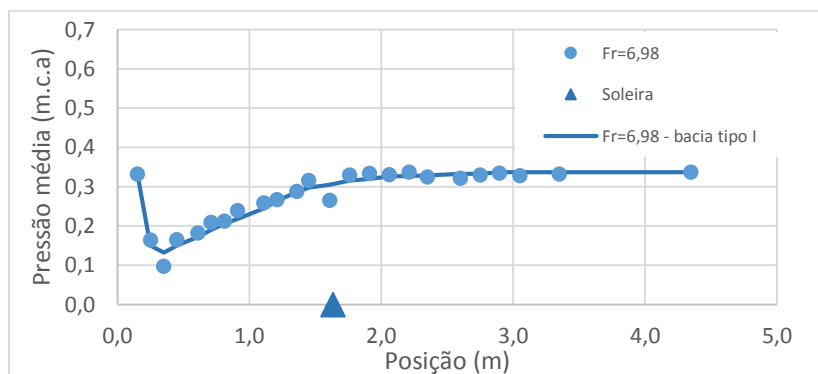
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,34$



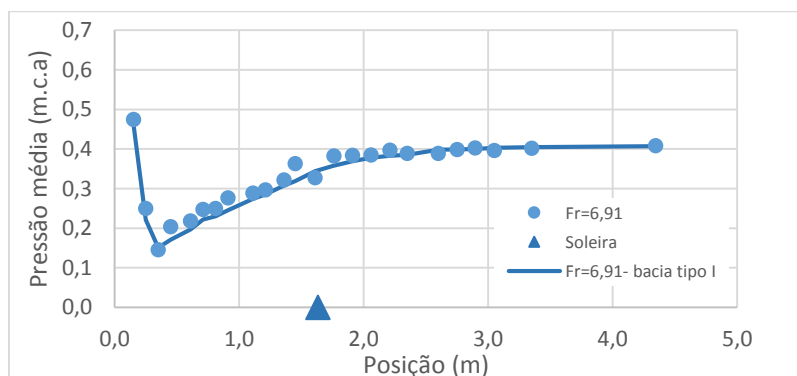
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:3, $Fr=5,98$



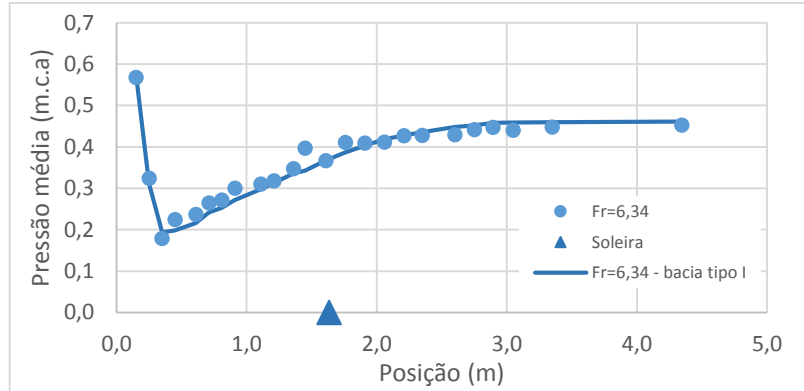
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:3, $Fr=7,44$



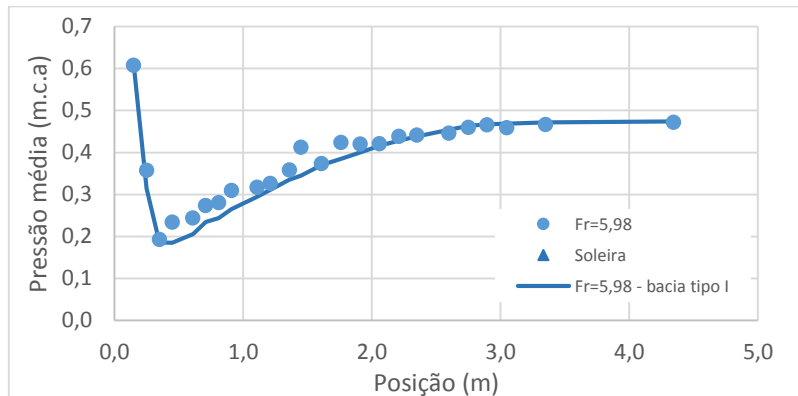
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:3, $Fr=6,98$



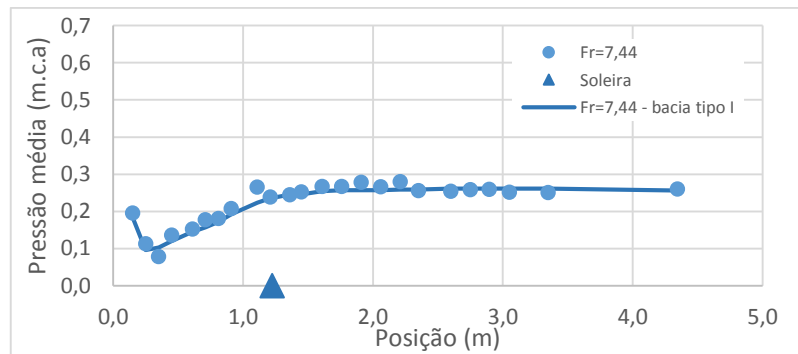
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:3, $Fr=6,91$



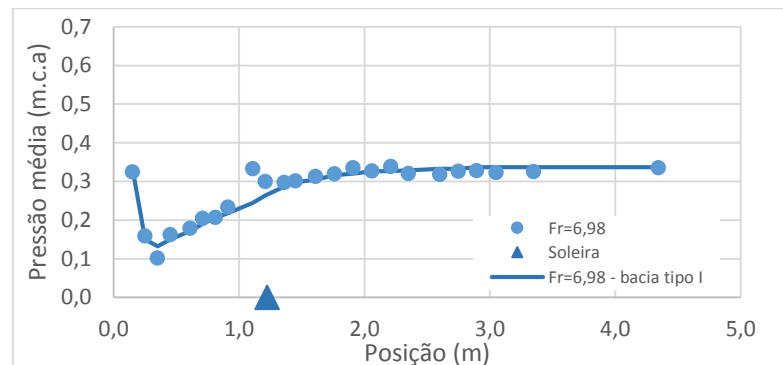
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:3, $Fr=6,34$



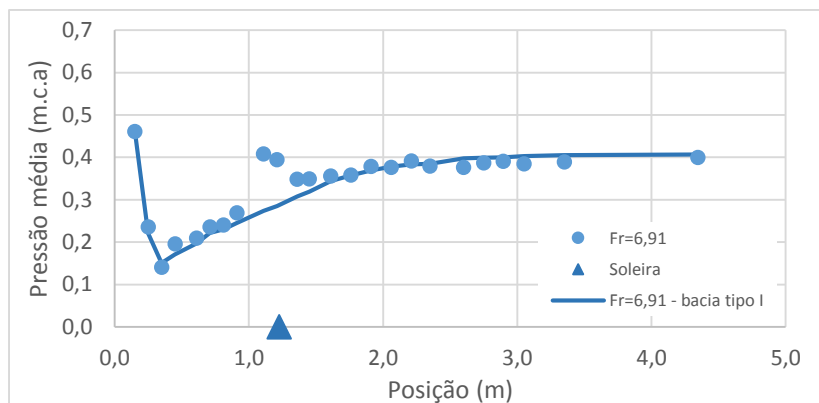
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:3, $Fr=5,98$



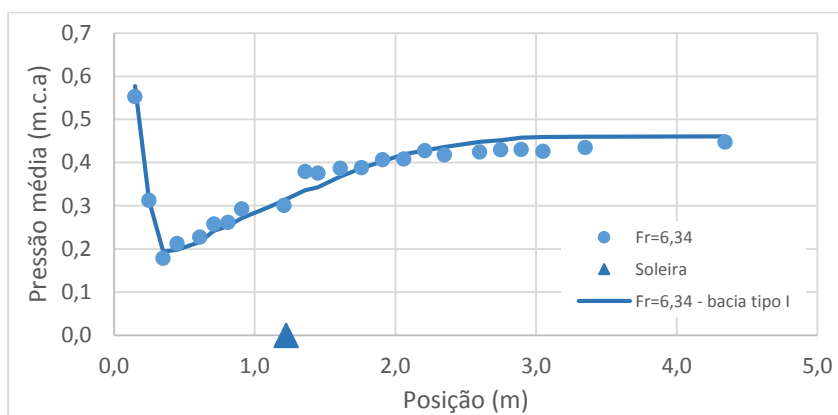
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 1/2H, inclinação 1:3, $Fr=7,44$



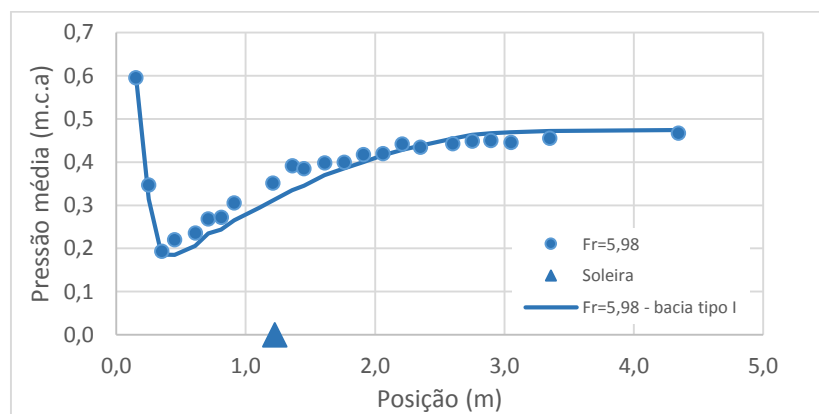
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição 1/2H, inclinação 1:3, $Fr=6,98$



Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:3, $Fr=6,91$



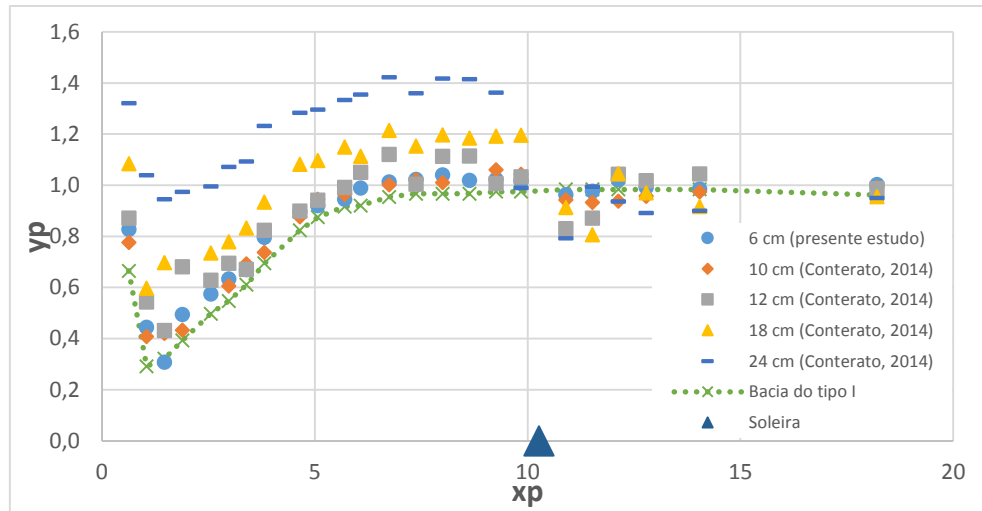
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:3, $Fr=6,34$



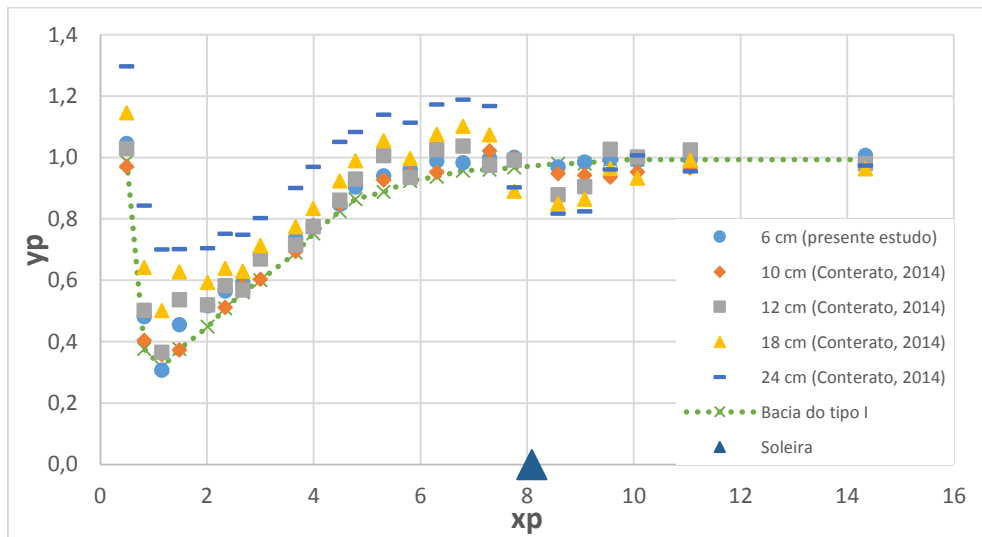
Pressões médias; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:3, $Fr=5,98$

ANEXO III

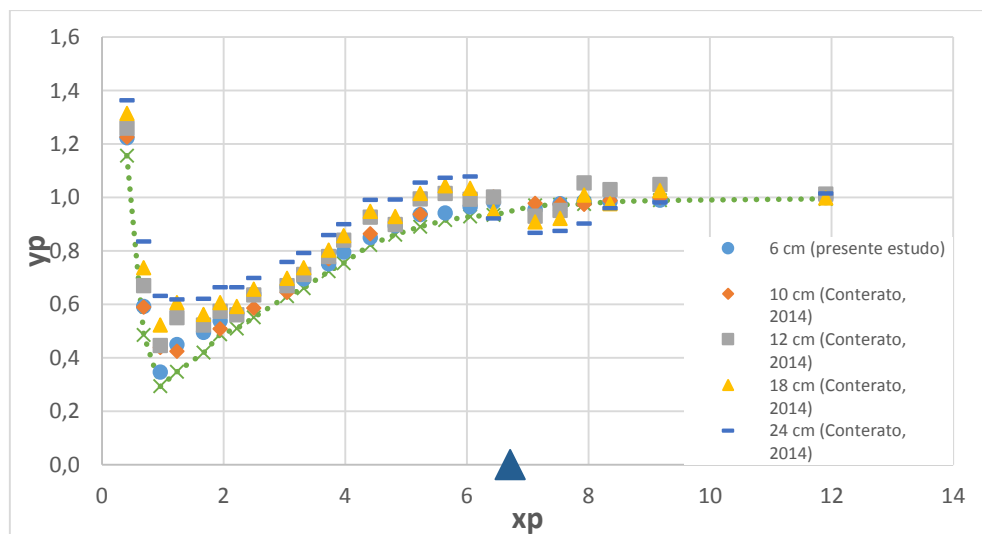
**DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES MÉDIAS
ADIMENSIONALIZADAS PARA CADA NÚMERO DE
FROUDE, PARA CADA POSIÇÃO DA SOLEIRA, VARIANDO
A ALTURA DA SOLEIRA.**



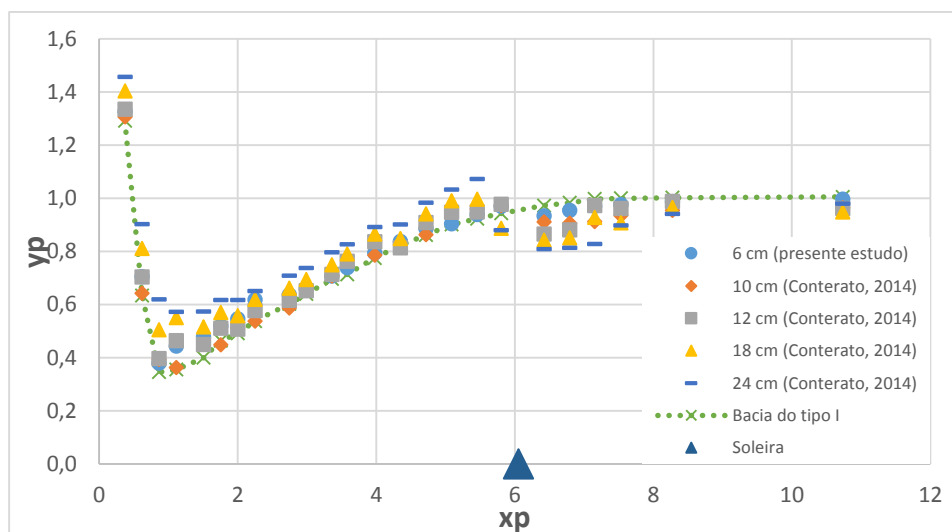
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=7.44$; posição $1/1H$, variando a altura



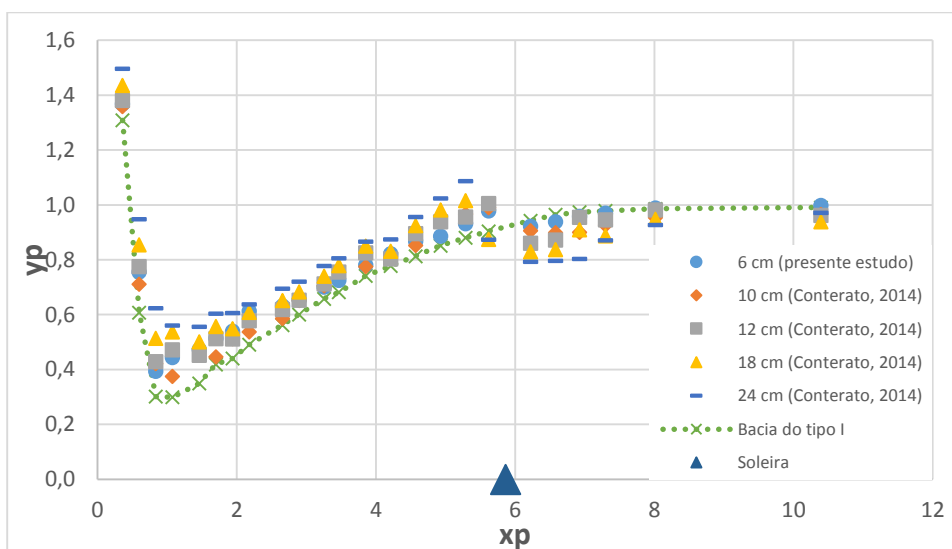
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6.98$; posição $1/1H$, variando a altura



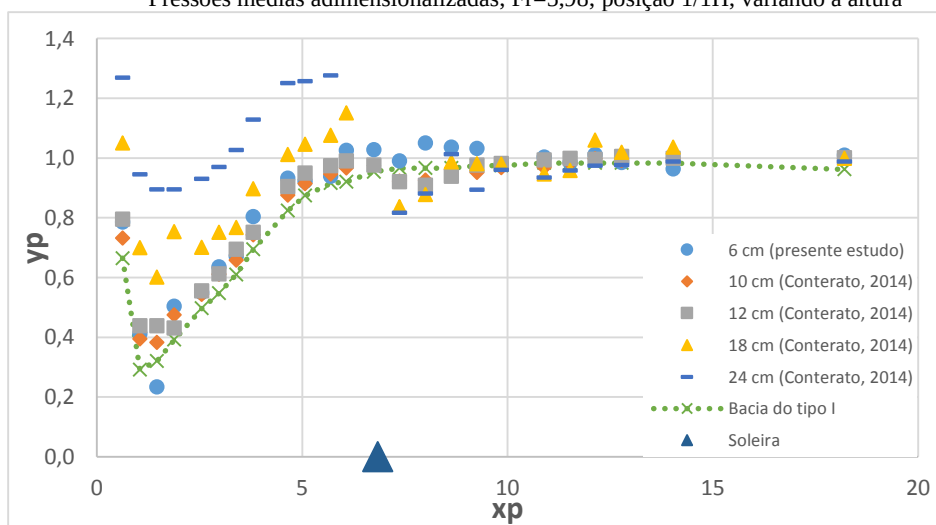
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6.91$; posição $1/1H$, variando a altura



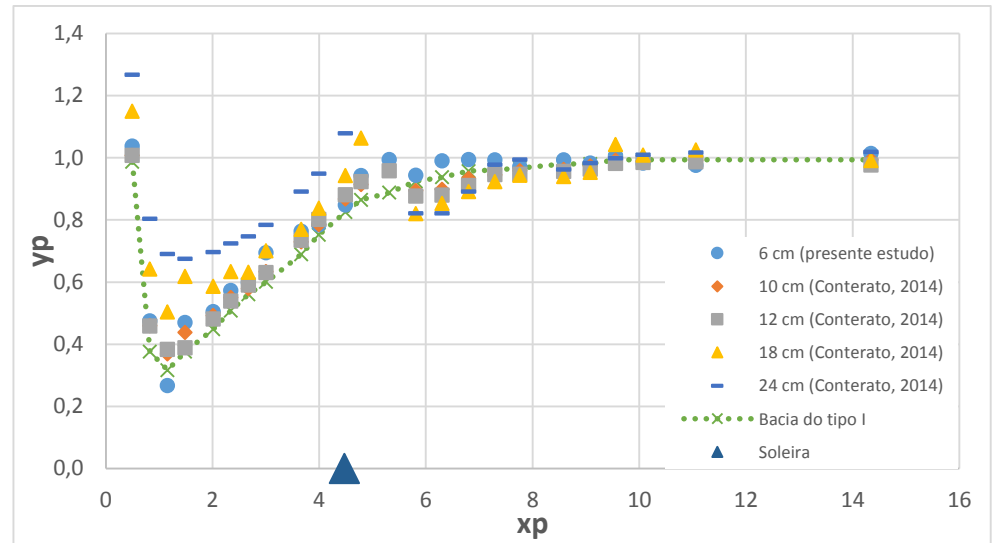
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6,34$; posição 1/1H, variando a altura



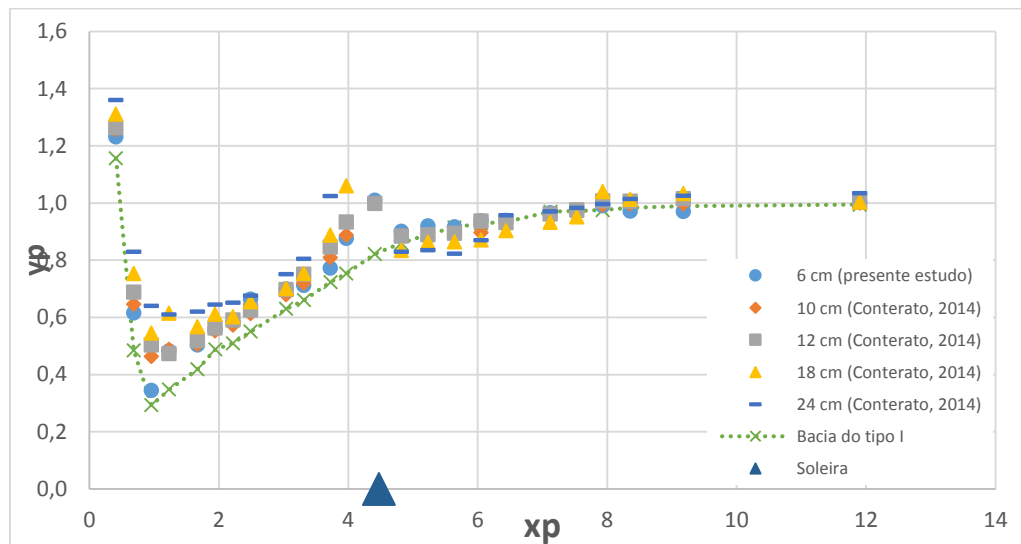
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=5,98$; posição 1/1H, variando a altura



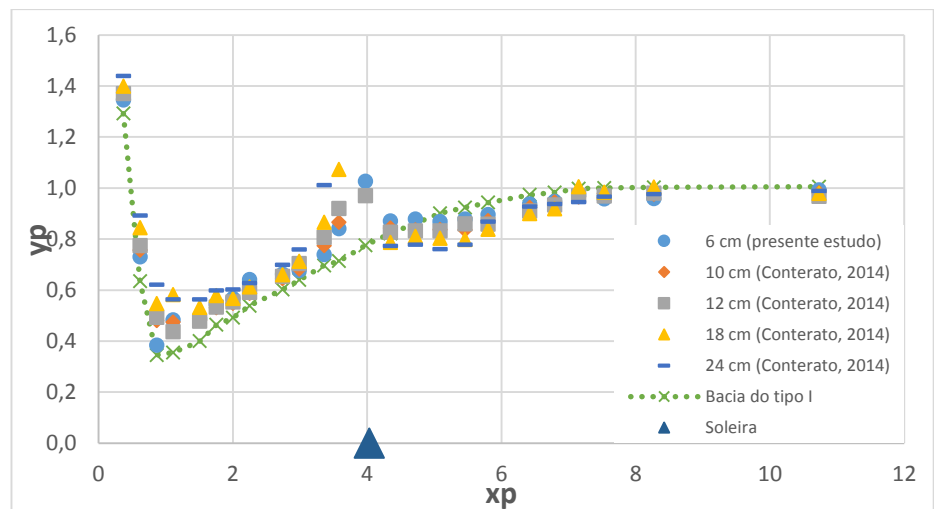
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=7,44$; posição 2/3H, variando a altura



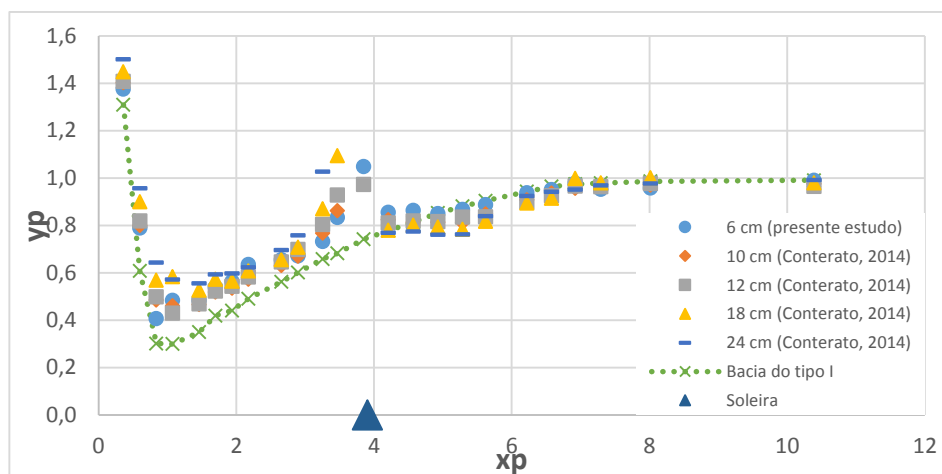
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6,98$; posição 2/3H, variando a altura



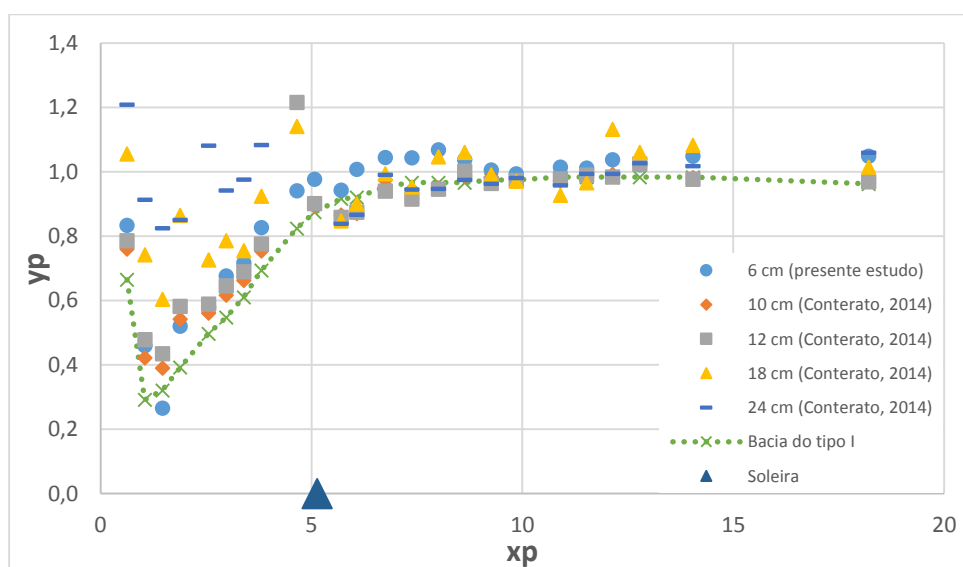
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6,91$; posição 2/3H, variando a altura



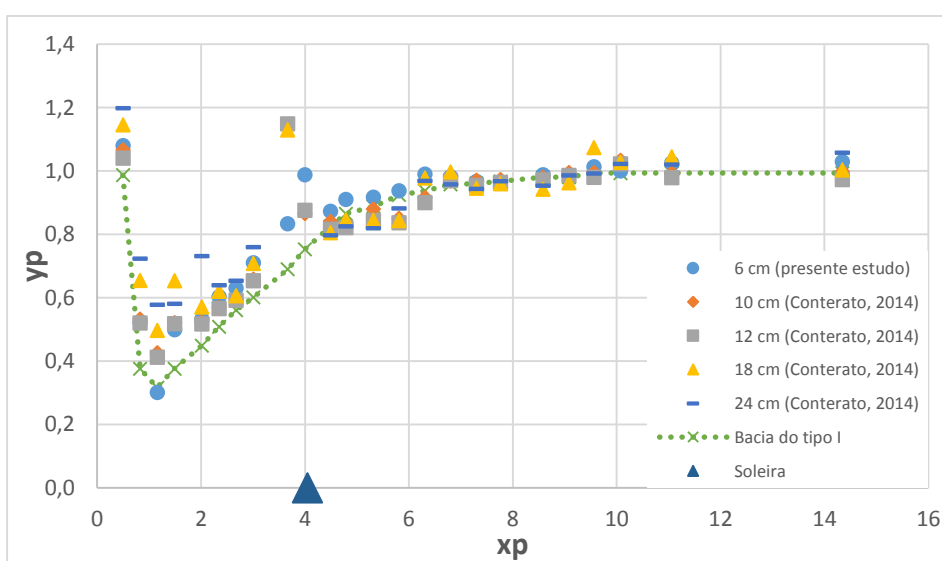
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6,34$; posição 2/3H, variando a altura



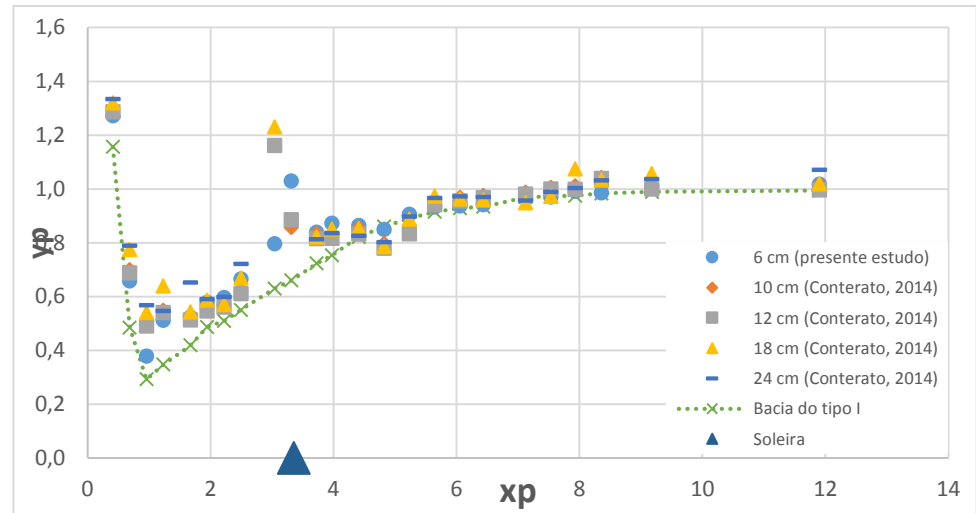
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=5.98$; posição $2/3H$, variando a altura



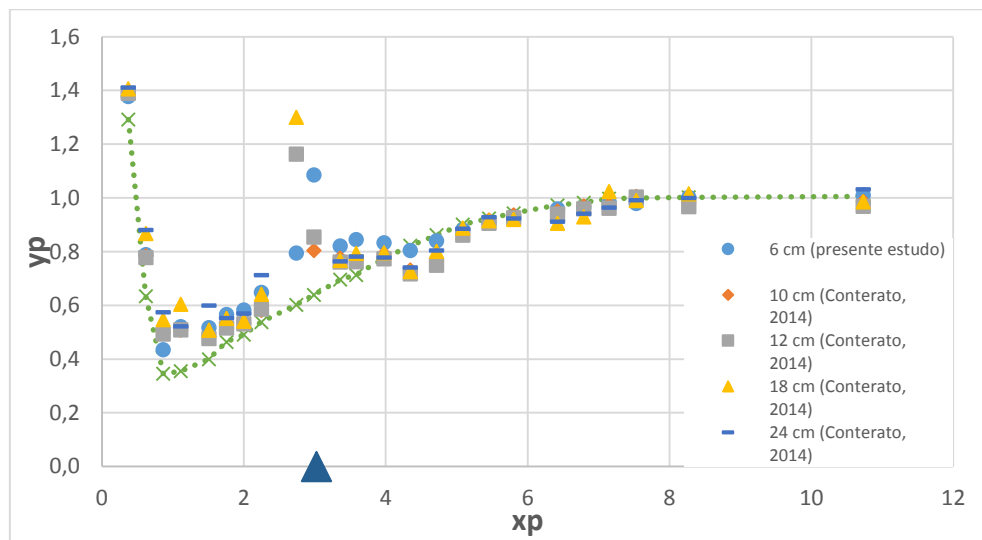
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=7.44$; posição $1/2H$, variando a altura



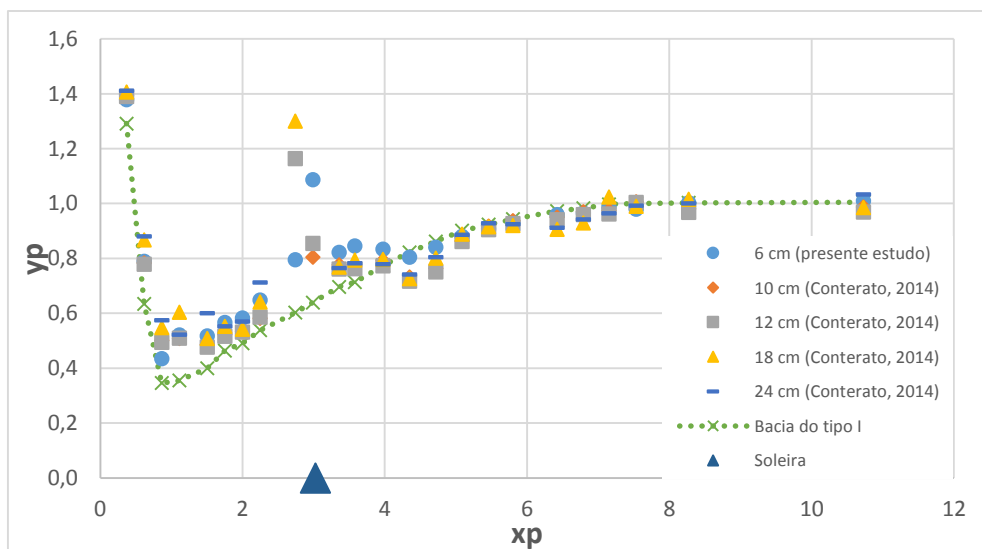
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6.98$; posição $1/2H$, variando a altura



Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6,91$; posição $1/2H$, variando a altura



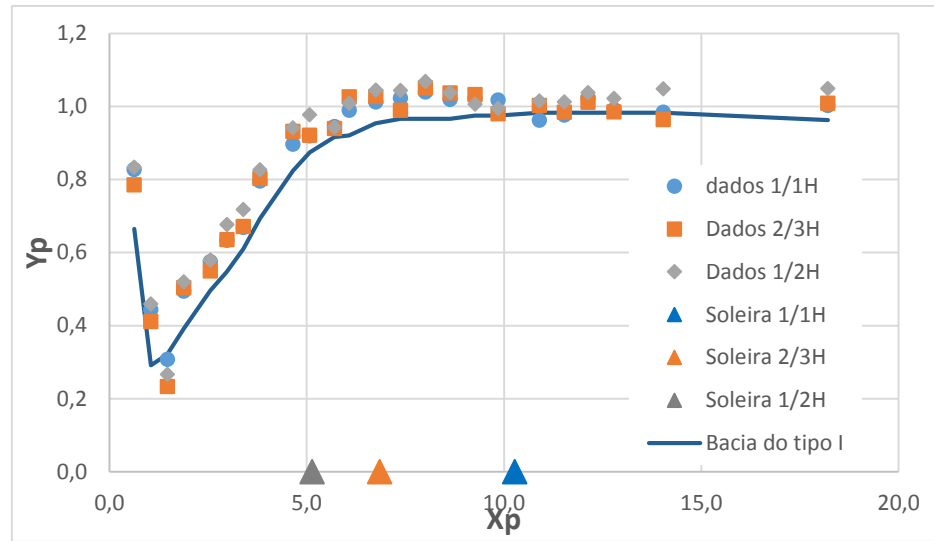
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=6,34$; posição $1/2H$, variando a altura



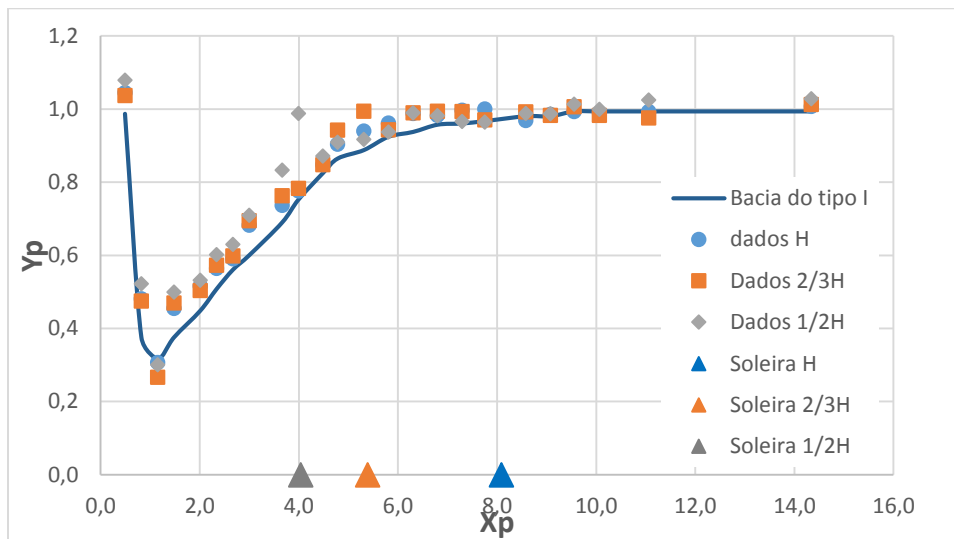
Pressões médias adimensionalizadas; $Fr=5,98$; posição $1/2H$, variando a altura

ANEXO IV

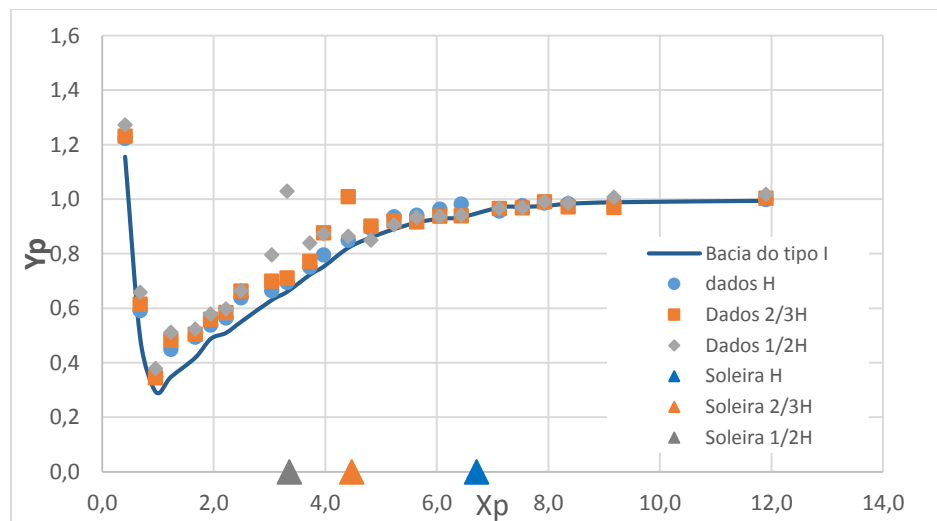
**DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS PRESSÕES
MÉDIAS ADIMENSIONALIZADAS PARA CADA FROUDE,
VARIANDO A POSIÇÃO DA SOLEIRA.**



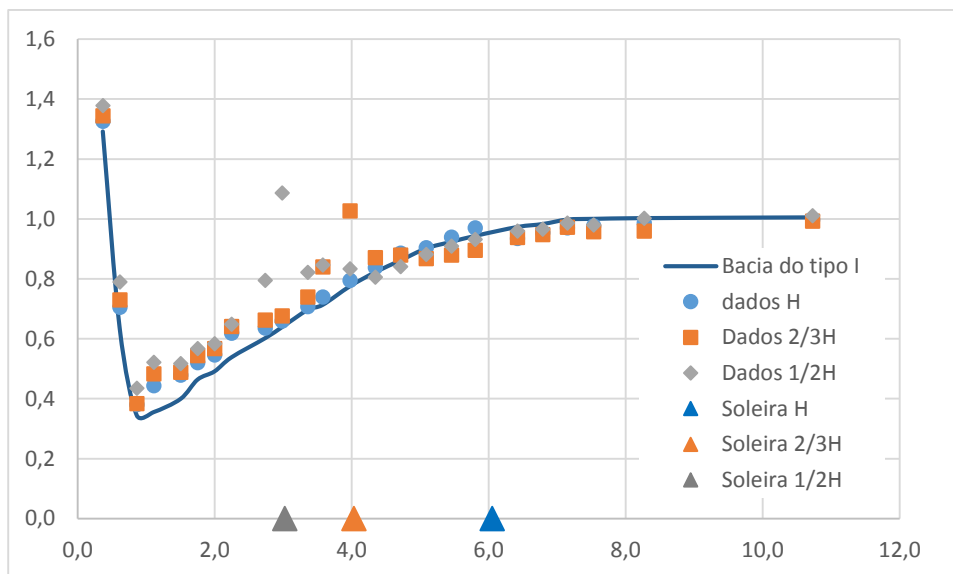
Pressões médias adimensionalizadas; $s=6$ cm $Fr=7,44$; variando posição



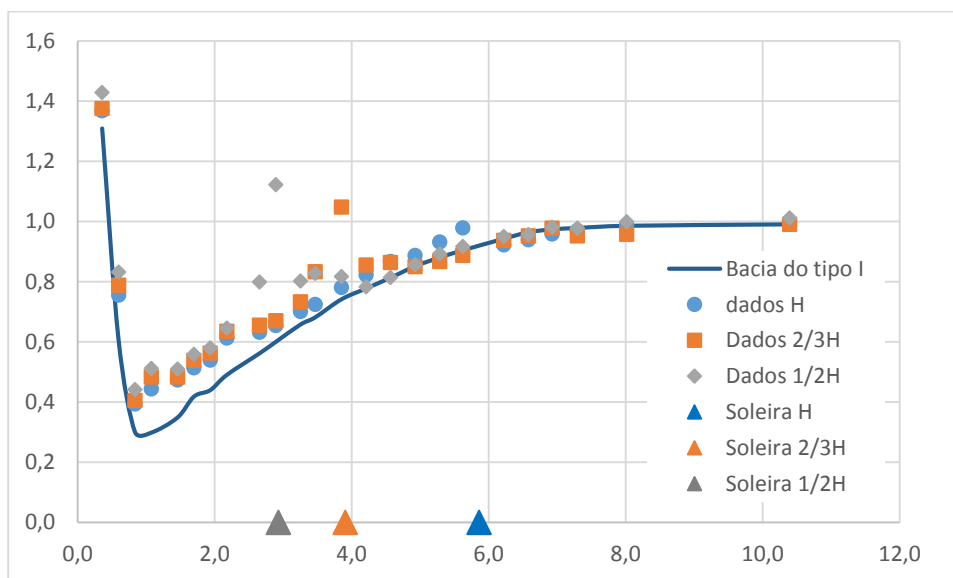
Pressões médias adimensionalizadas; $s=6$ cm $Fr=6,98$; variando posição



Pressões médias adimensionalizadas; $s=6$ cm $Fr=6,91$; variando posição



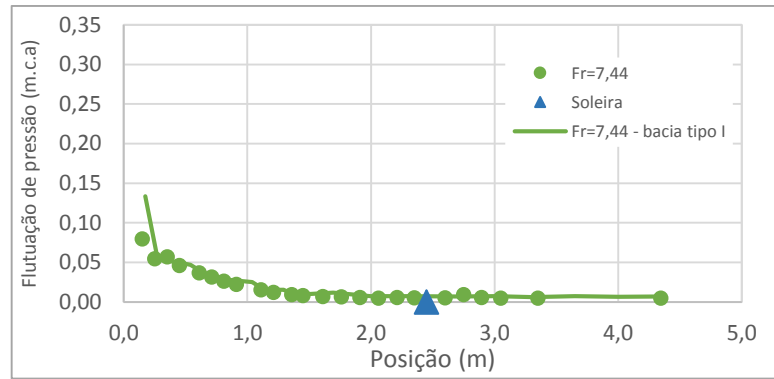
Pressões médias adimensionalizadas; $s=6$ cm; $Fr=6,34$; variando posição



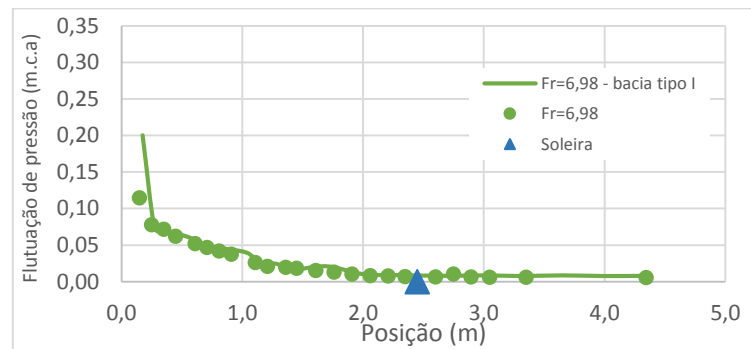
Pressões médias adimensionalizadas; $s=6$ cm; $Fr=5,98$; variando posição

ANEXO V

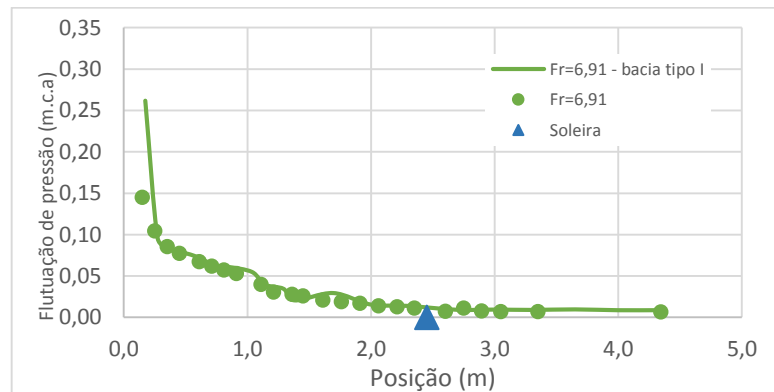
DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO BRUTAS EM COMPARAÇÃO COM RESULTADOS EM BACIA TIPO I



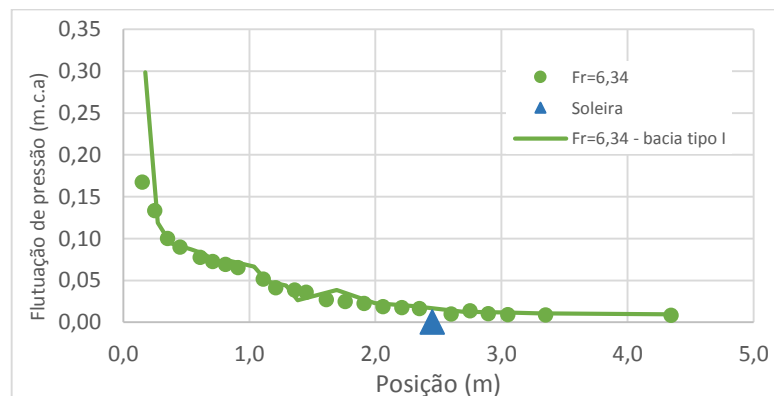
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=7,44$



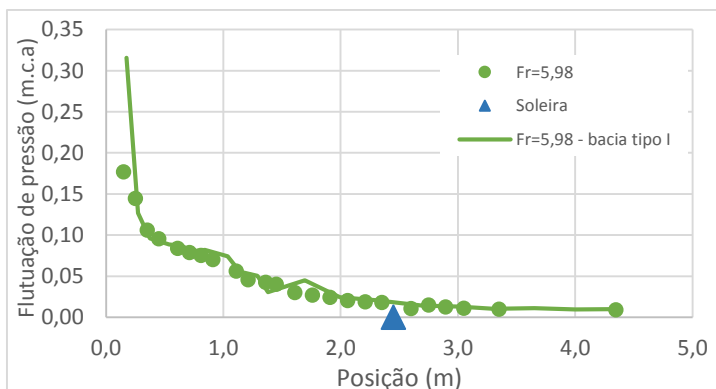
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=6,98$



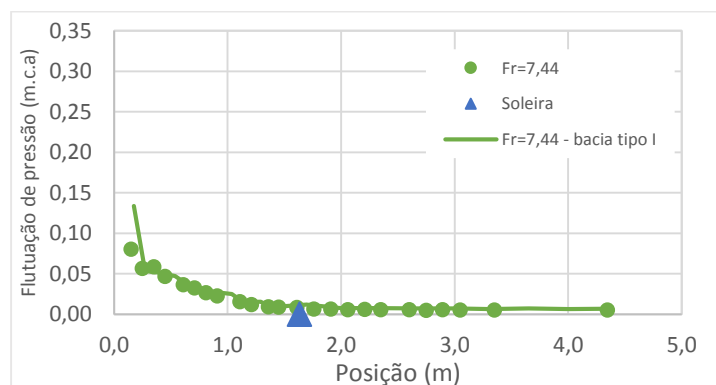
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=6,91$



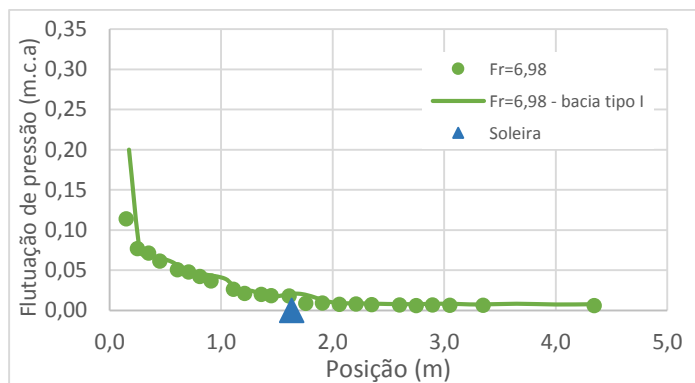
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=6,34$



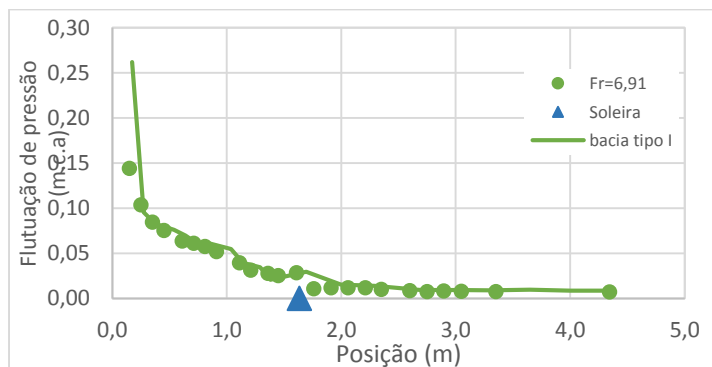
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:1$, $Fr=5,98$



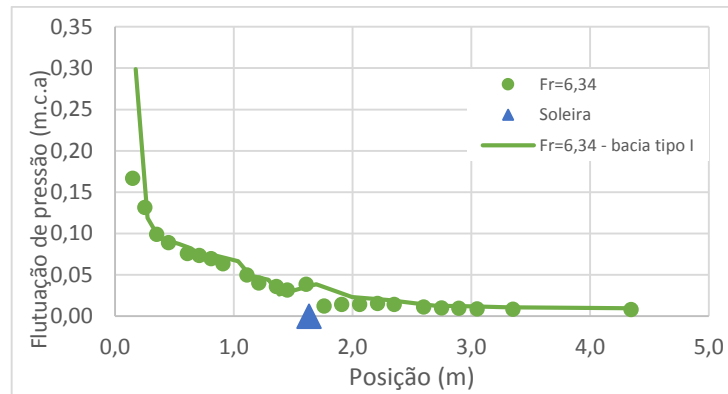
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:1$, $Fr=7,44$



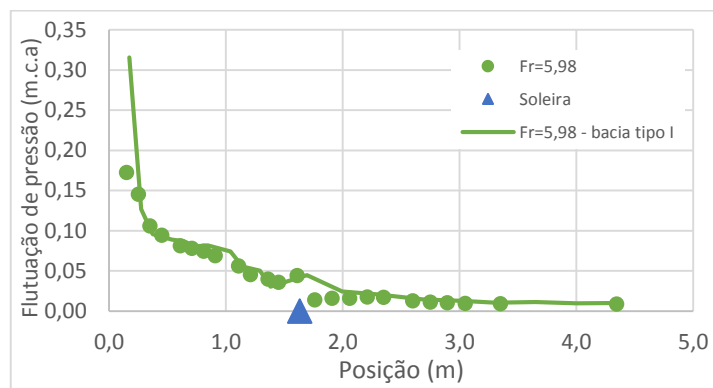
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,98$



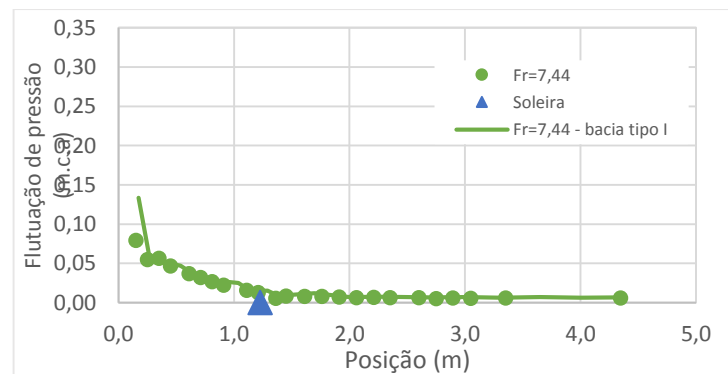
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,91$



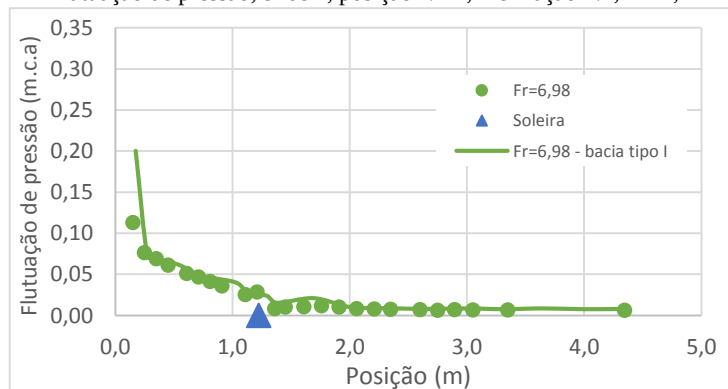
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,34$



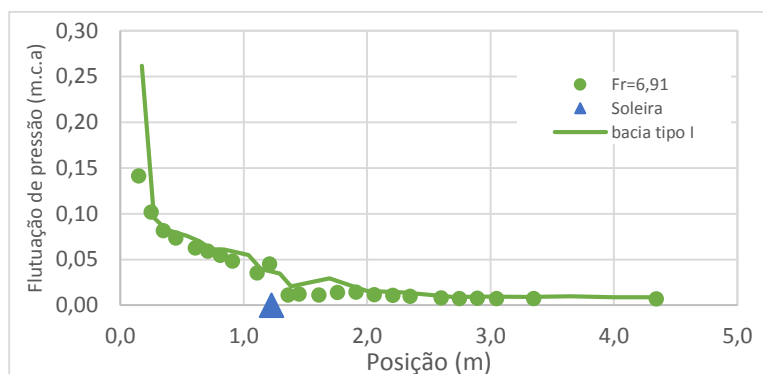
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:1$, $Fr=5,98$



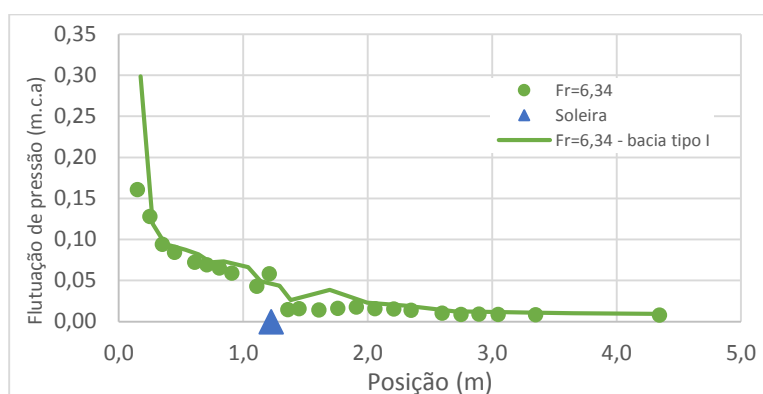
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=7,44$



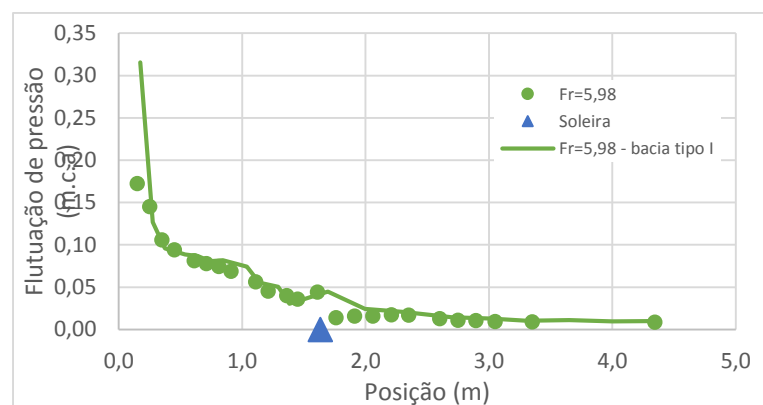
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,98$



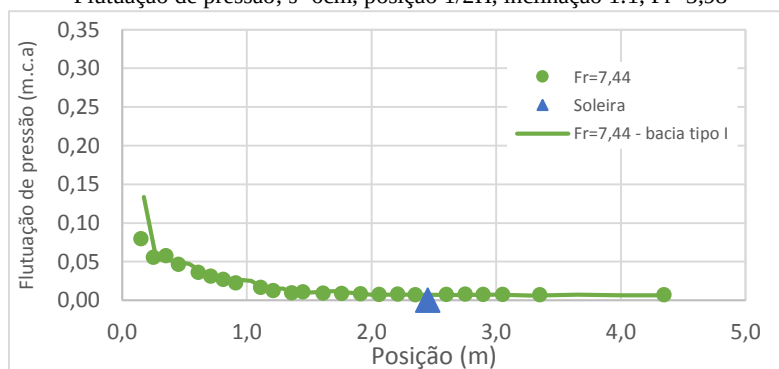
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,91$



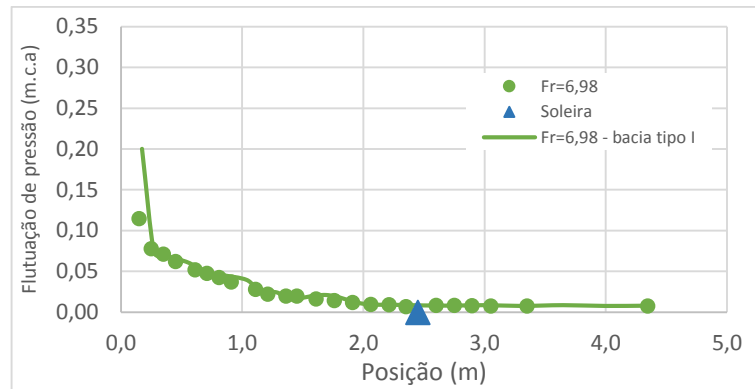
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,34$



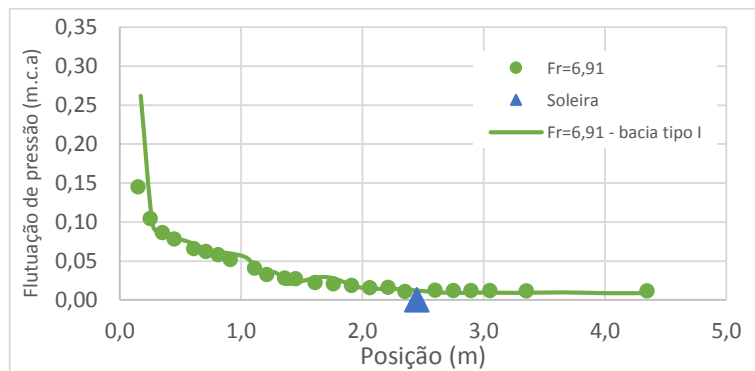
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=5,98$



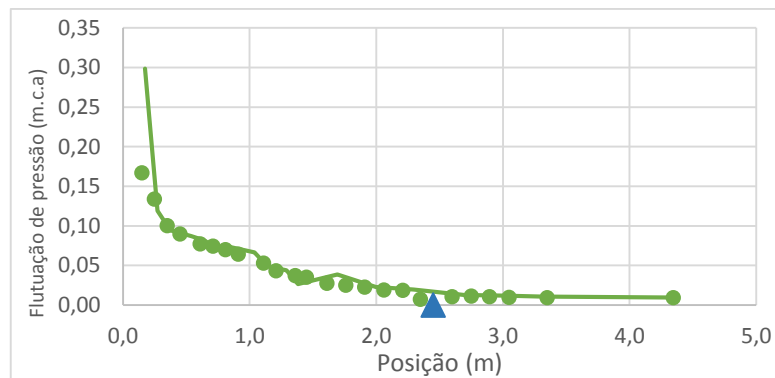
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=7,44$



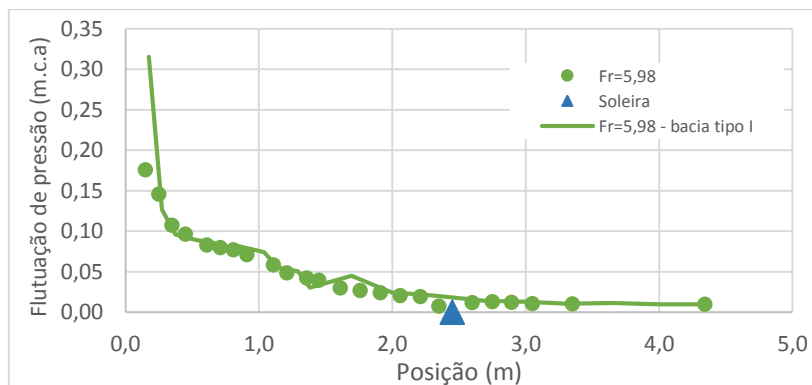
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,98$



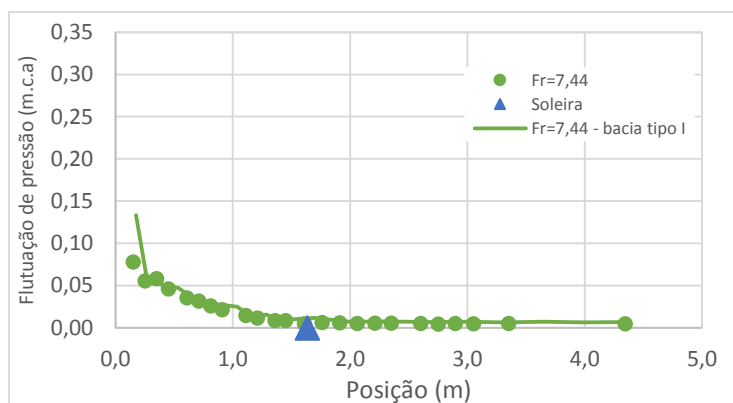
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,91$



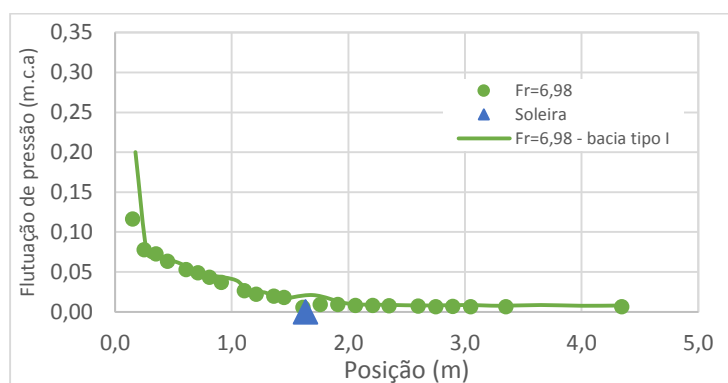
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,34$



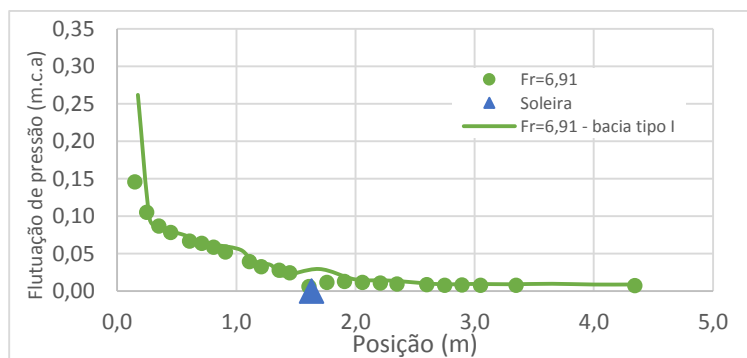
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=5,98$



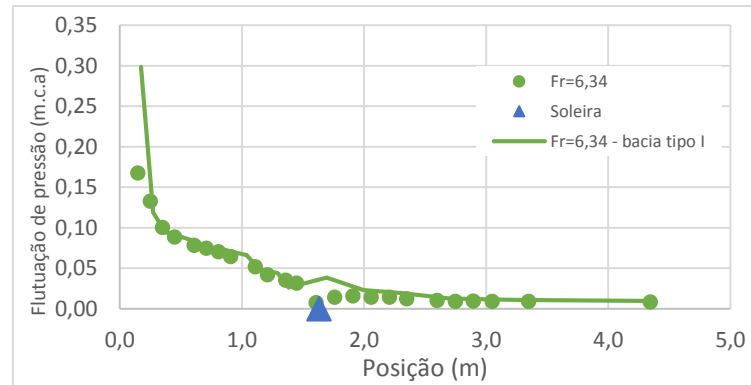
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:3$, $Fr=7,44$



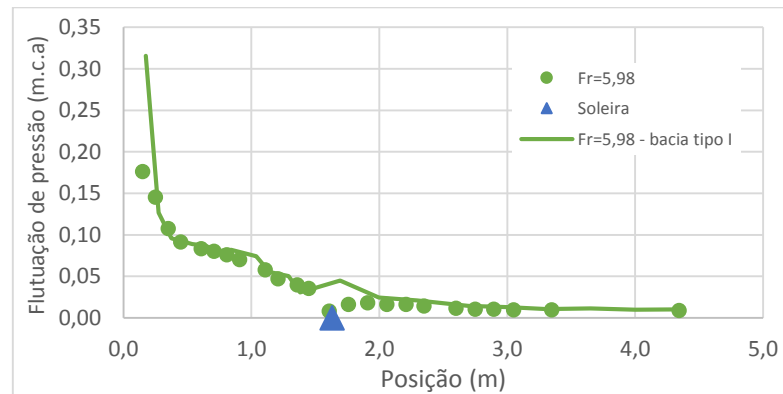
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,98$



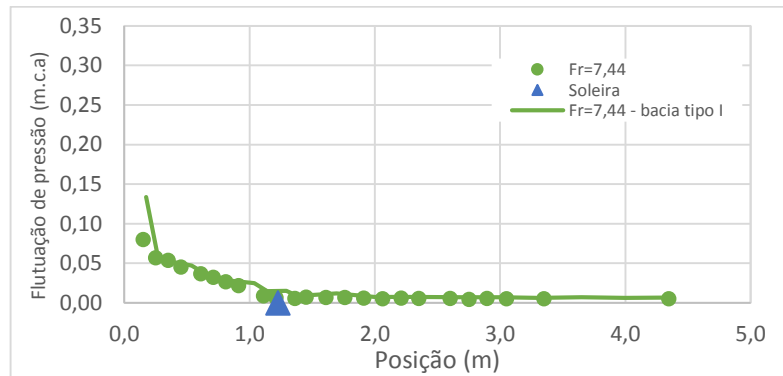
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,91$



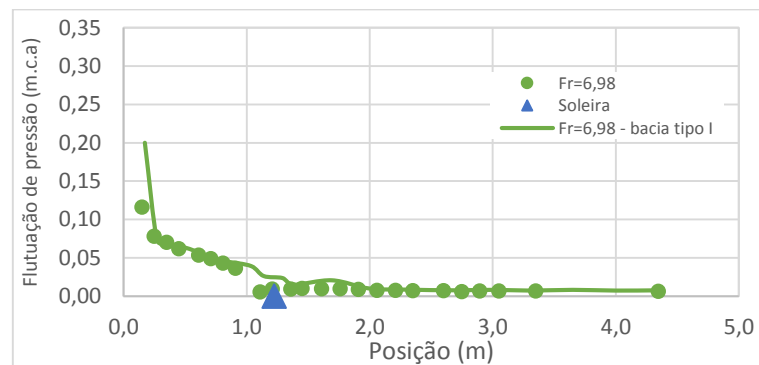
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:3, $Fr=6,34$



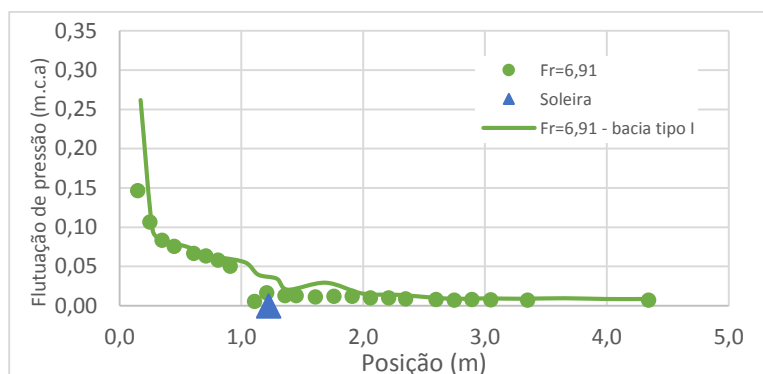
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:3, $Fr=5,98$



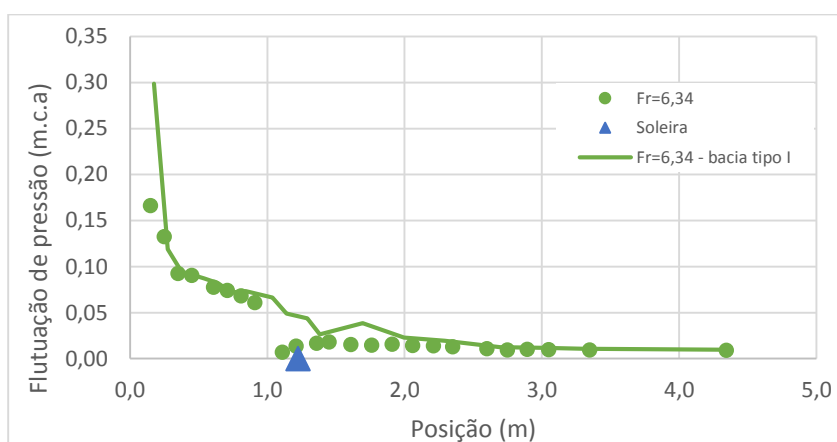
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:3, $Fr=7,44$



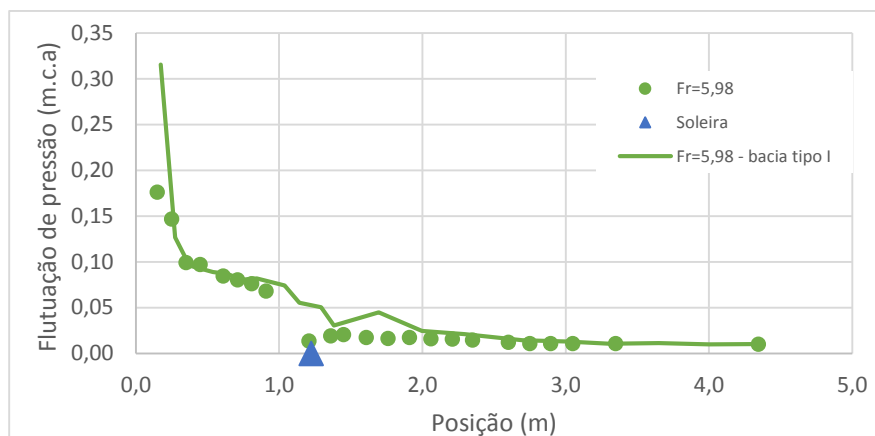
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,98$



Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,91$



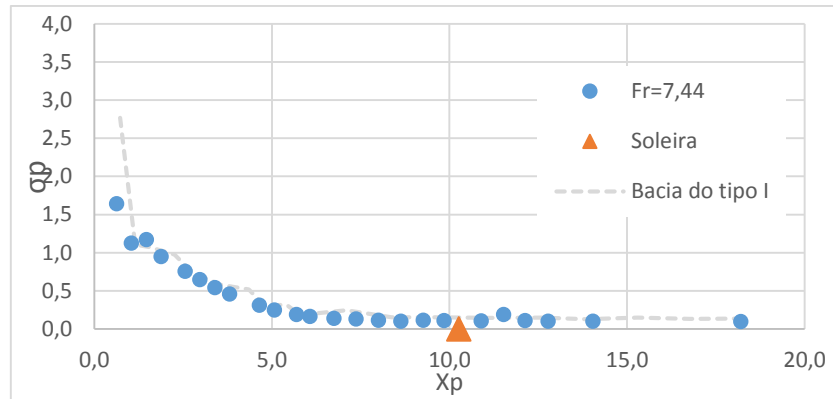
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,34$



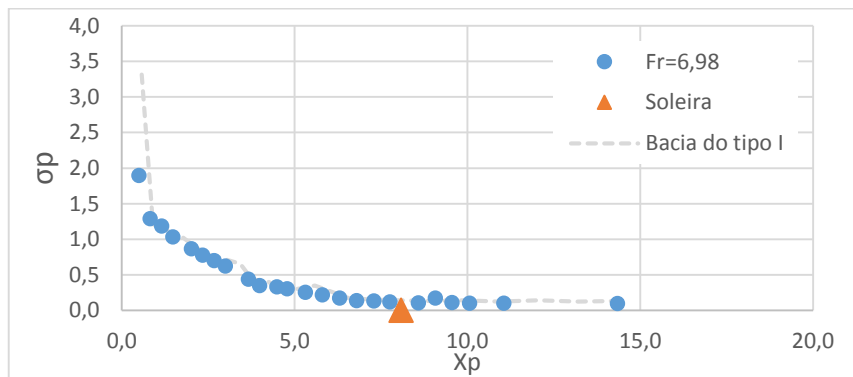
Flutuação de pressão; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=5,98$

ANEXO VI

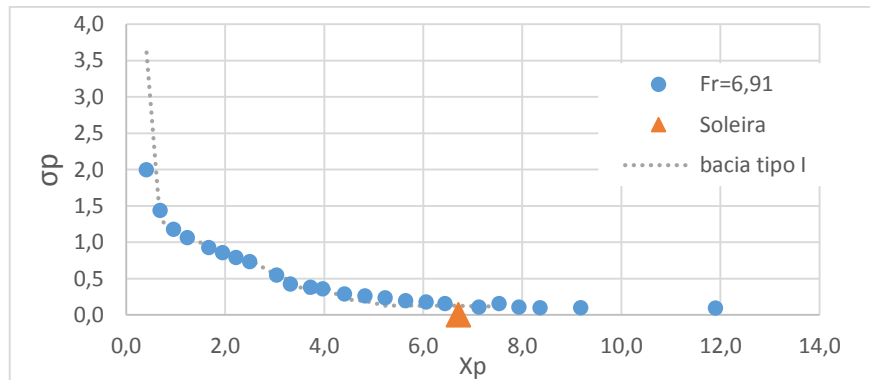
DISTRIBUIÇÃO LONGITUDINAL DAS FLUTUAÇÕES DE PRESSÃO ADIMENSIONALIZADAS PARA CADA VAZÃO E CADA POSIÇÃO



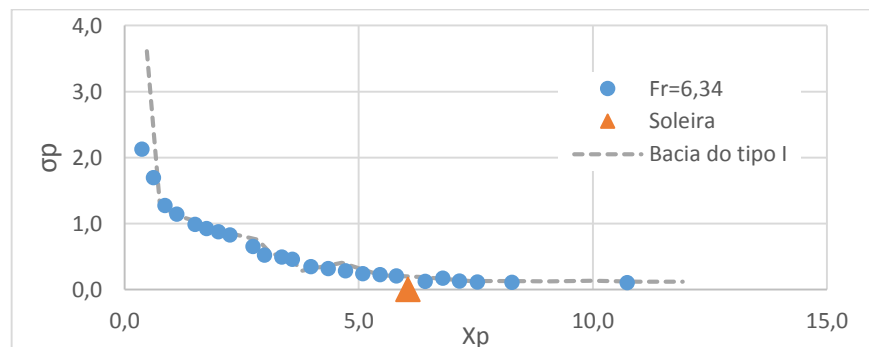
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=7,44$



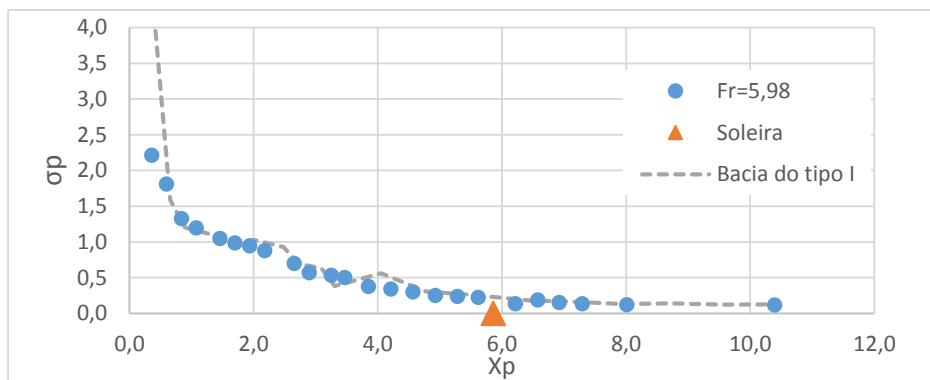
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=6,98$



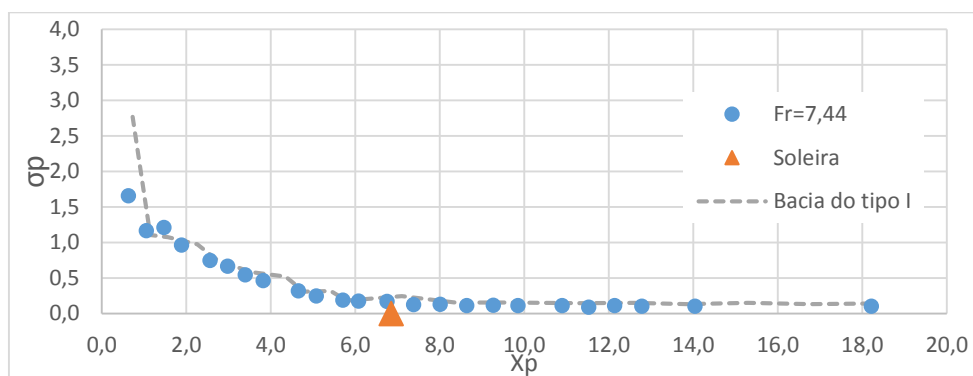
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=6,91$



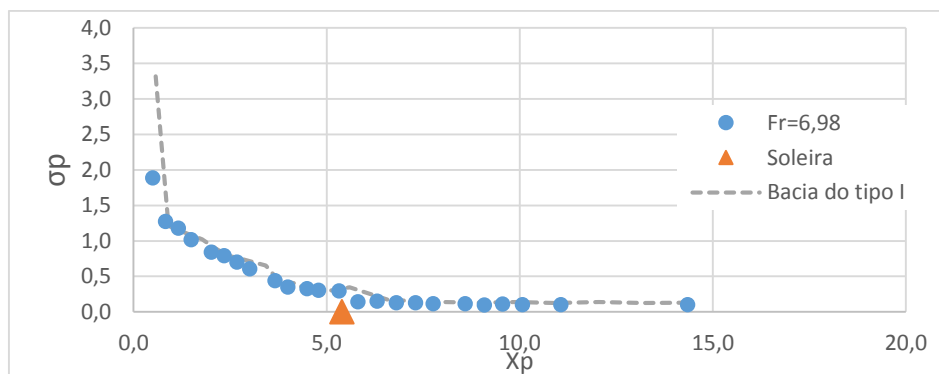
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=6,34$



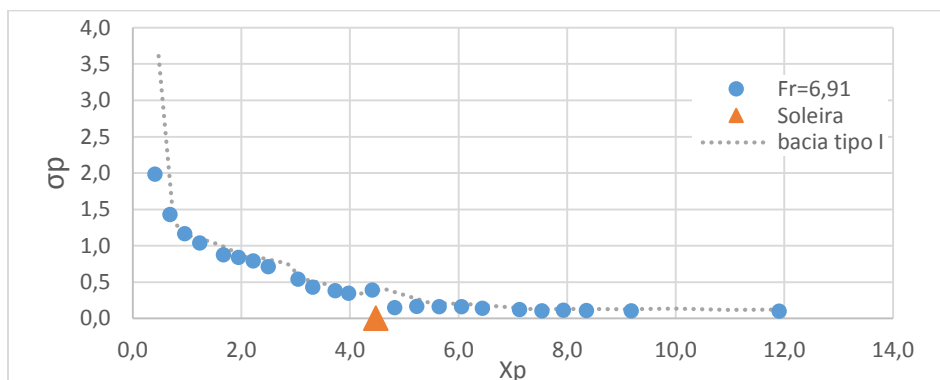
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:1, $Fr=5,98$



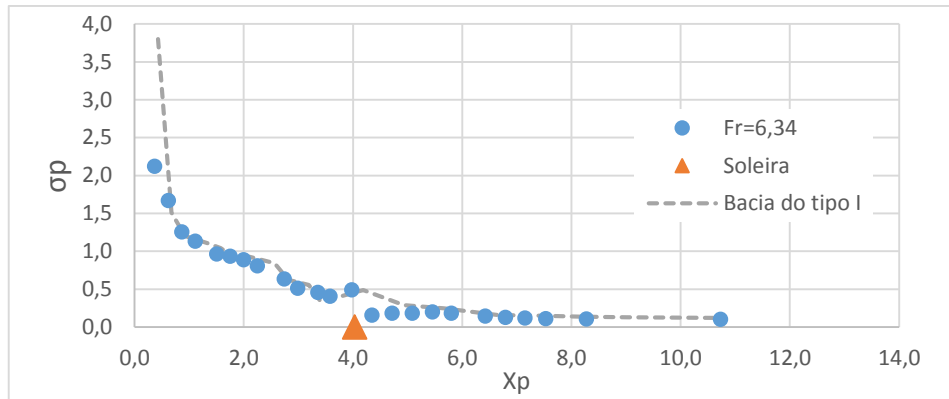
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:1, $Fr=7,44$



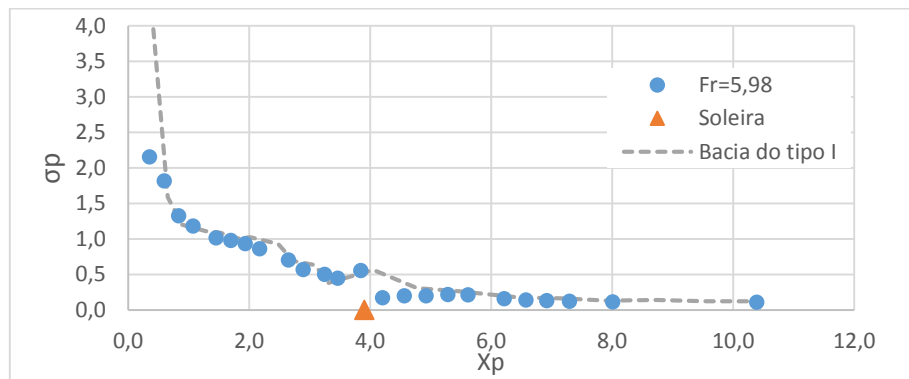
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:1, $Fr=6,98$



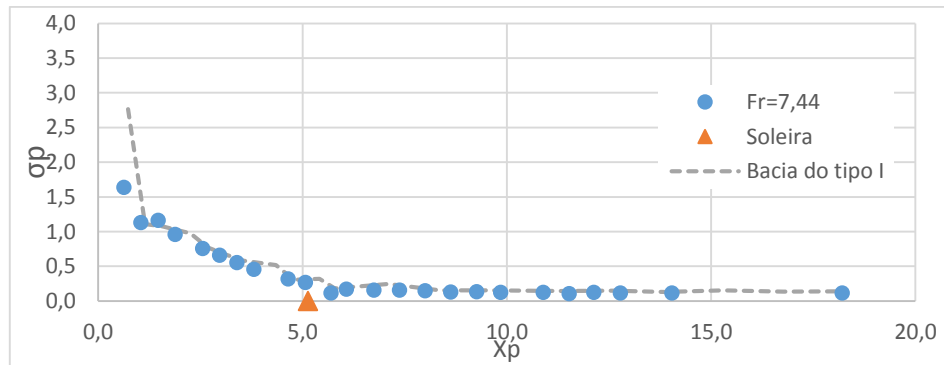
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 2/3H, inclinação 1:1, $Fr=6,91$



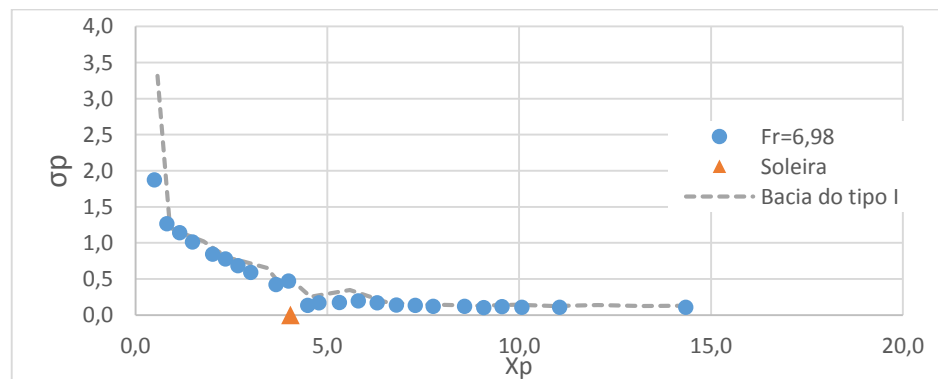
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:1, $Fr=6,34$



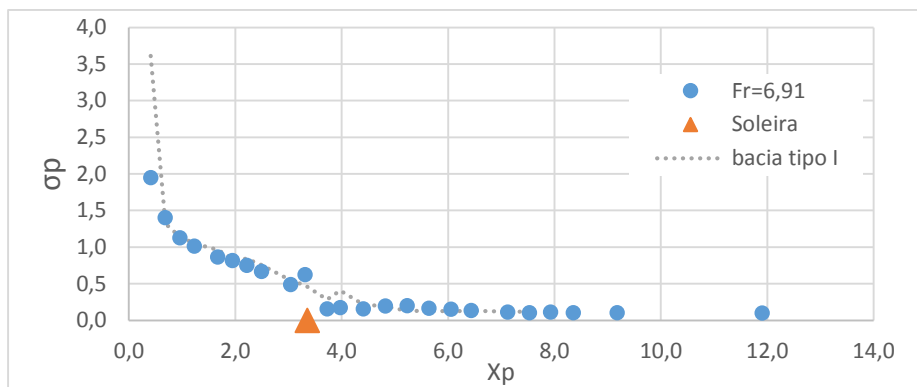
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:1, $Fr=5,98$



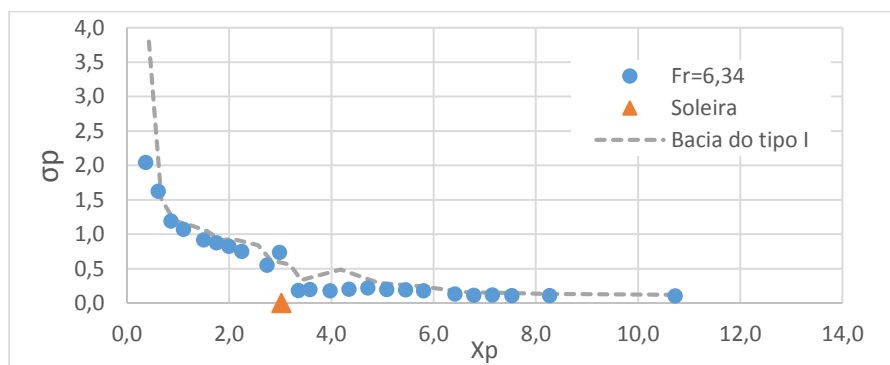
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=7,44$



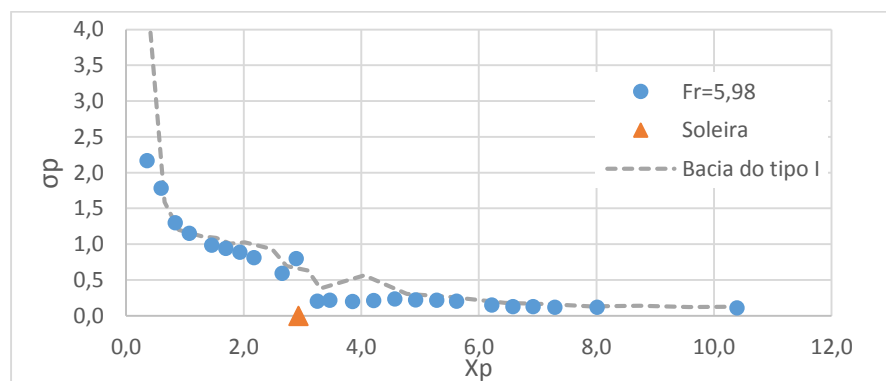
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:1, $Fr=6,98$



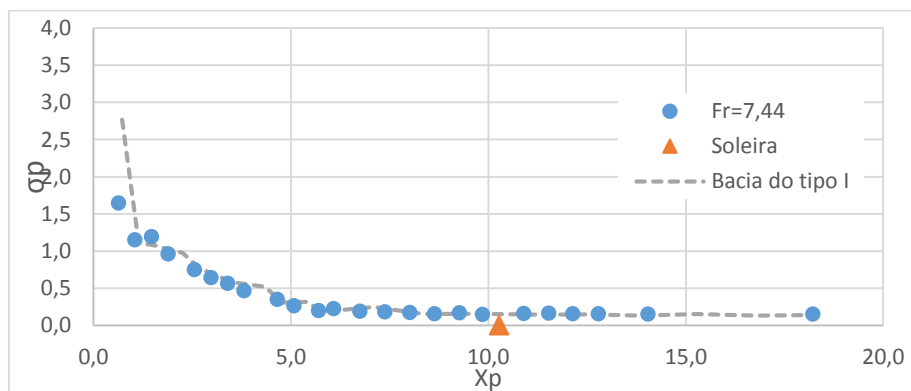
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,91$



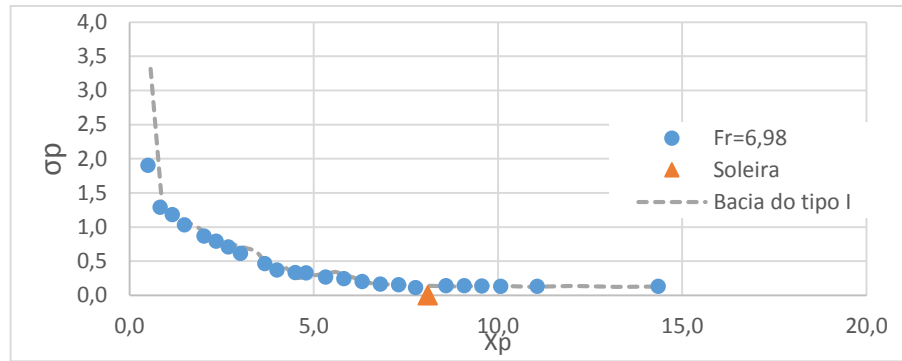
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=6,34$



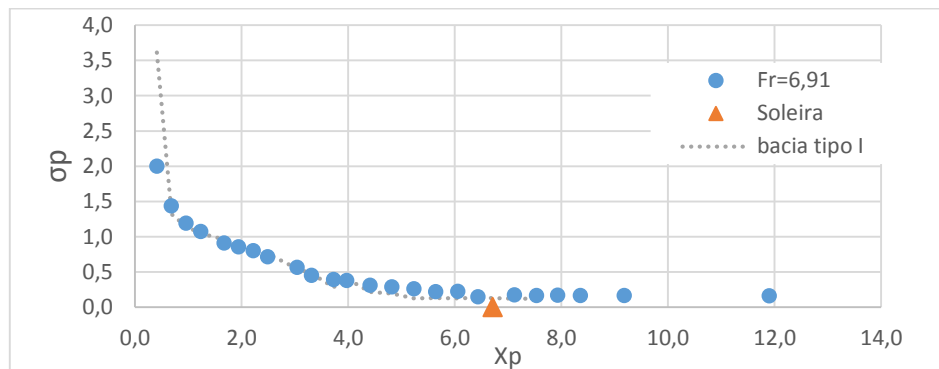
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:1$, $Fr=5,98$



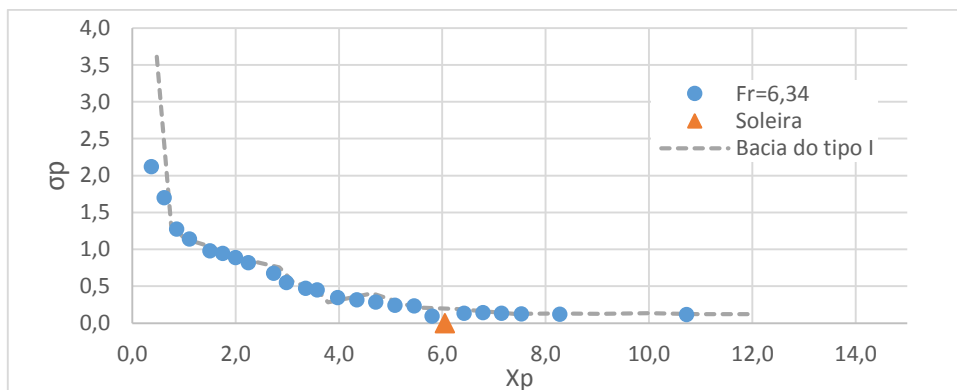
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/1H$, inclinação $1:3$, $Fr=7,44$



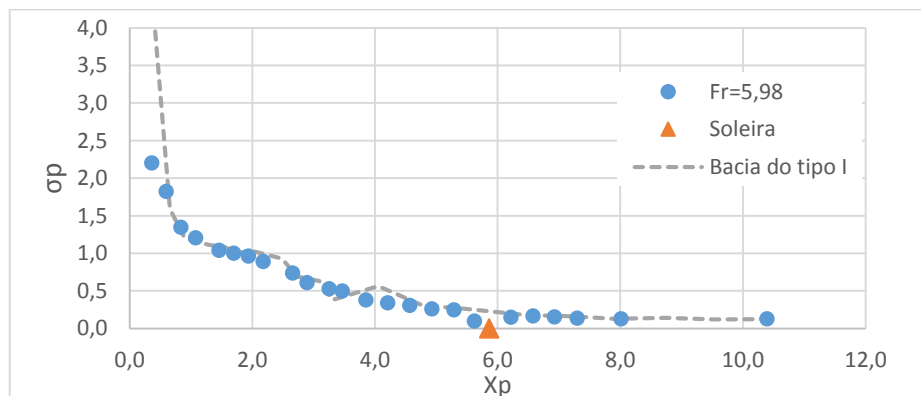
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:3, $Fr=6,98$



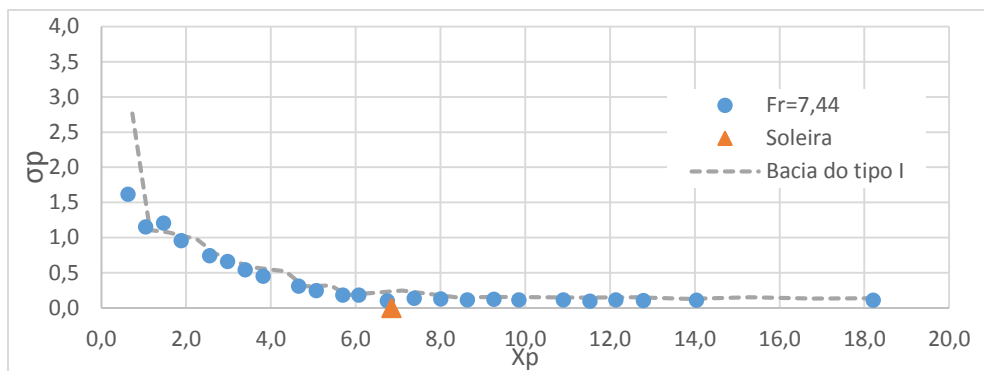
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:3, $Fr=6,91$



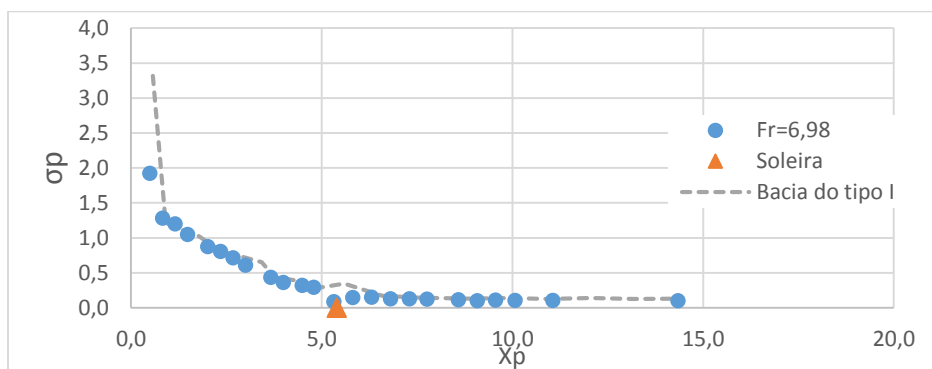
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:3, $Fr=6,34$



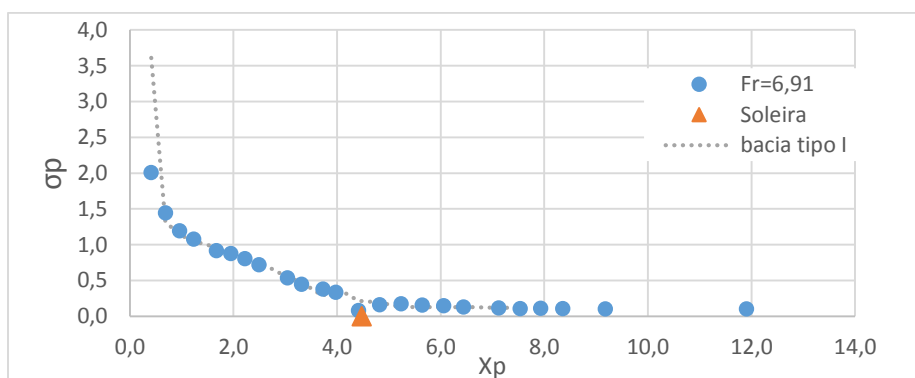
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição 1/1H, inclinação 1:3, $Fr=5,98$



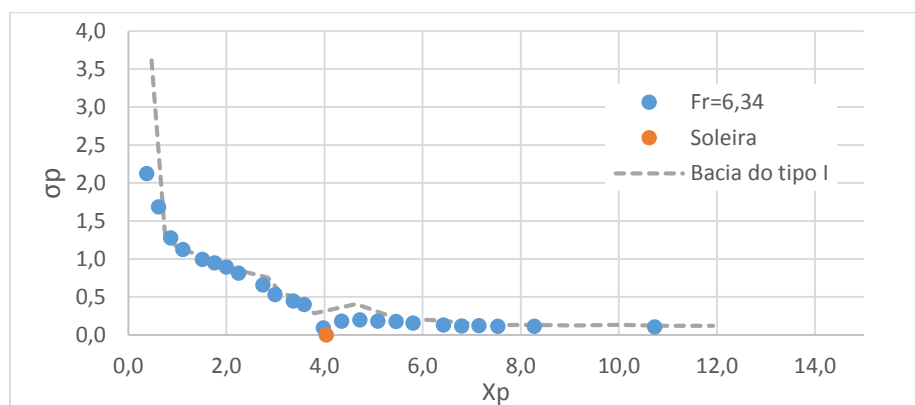
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:3, $Fr=7,44$



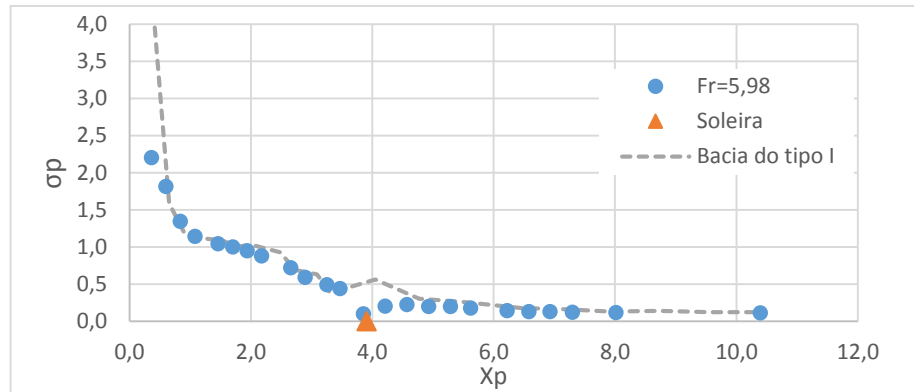
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:3, $Fr=6,98$



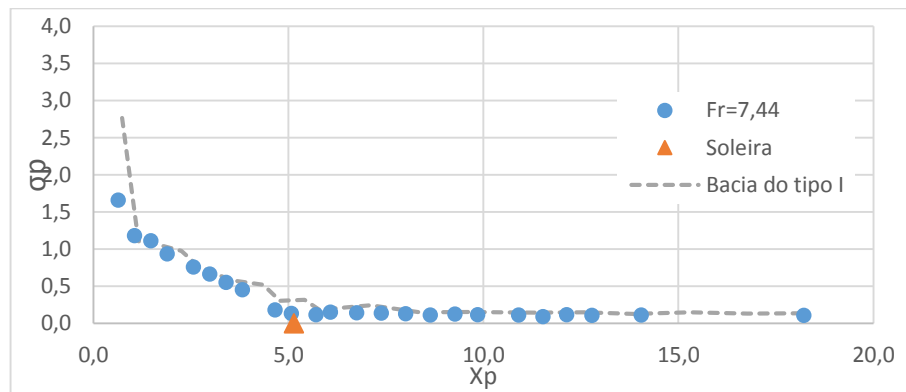
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:3, $Fr=6,91$



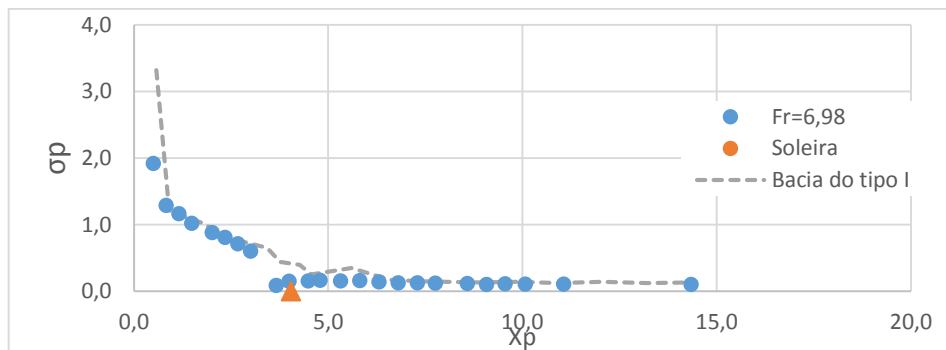
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação 1:3, $Fr=6,34$



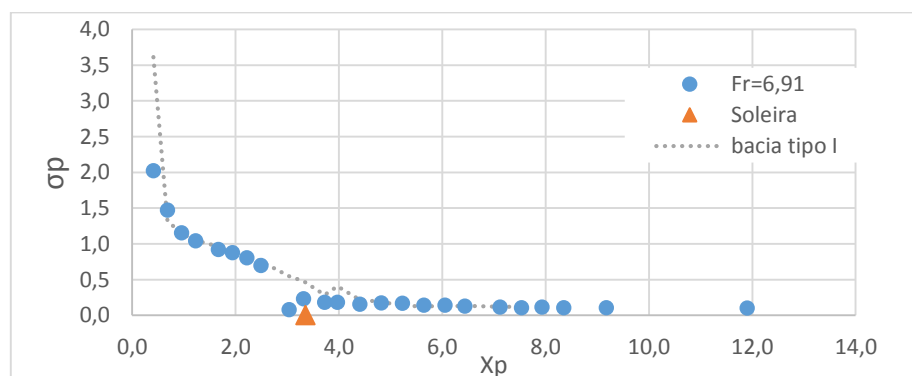
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $2/3H$, inclinação $1:3$, $Fr=5,98$



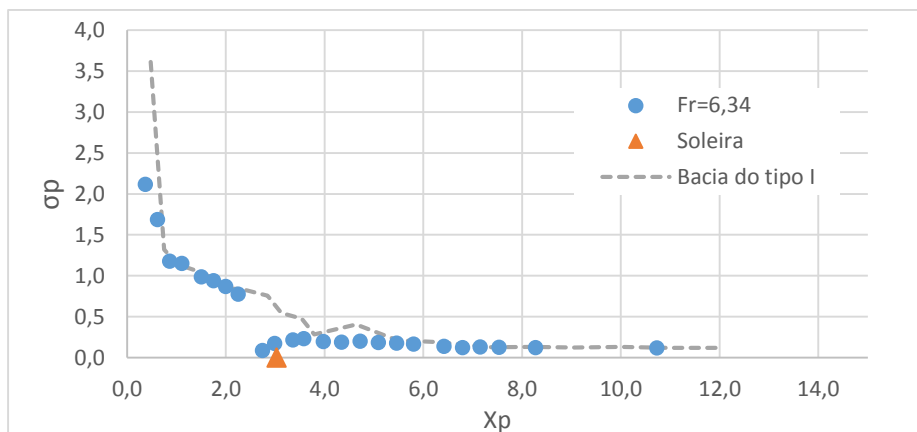
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=7,44$



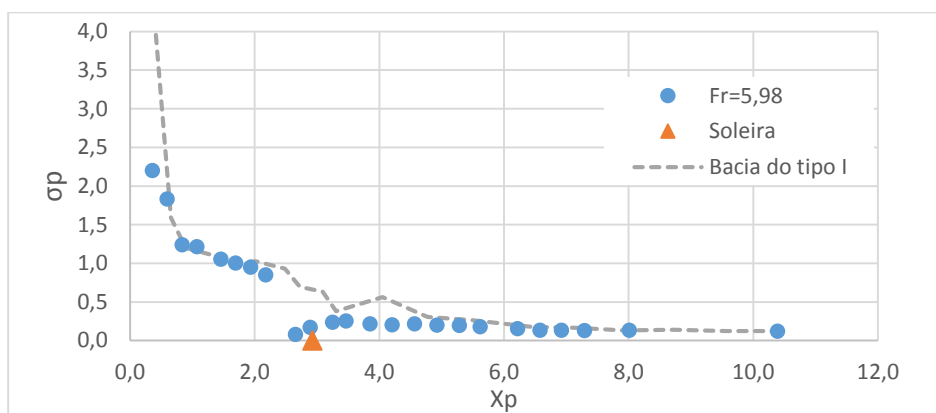
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,98$



Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação $1:3$, $Fr=6,91$



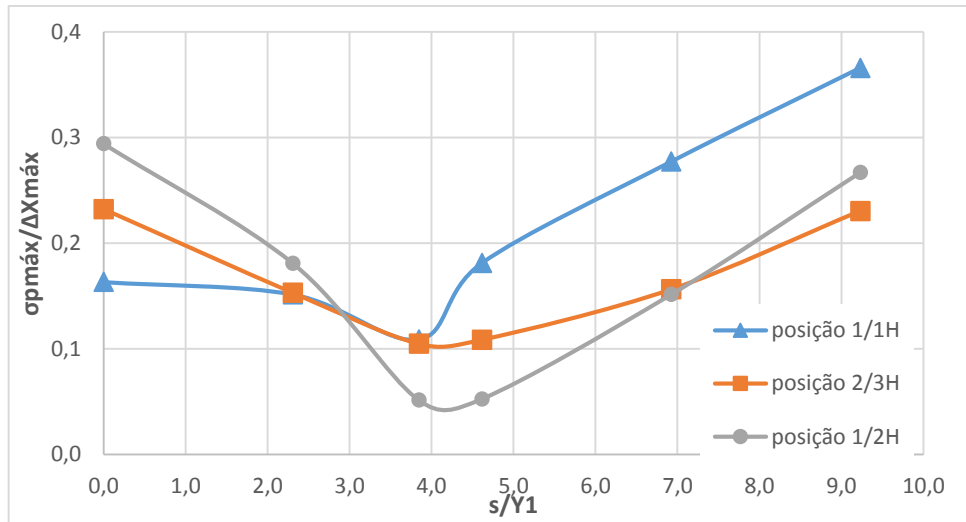
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:3, $Fr=6,34$



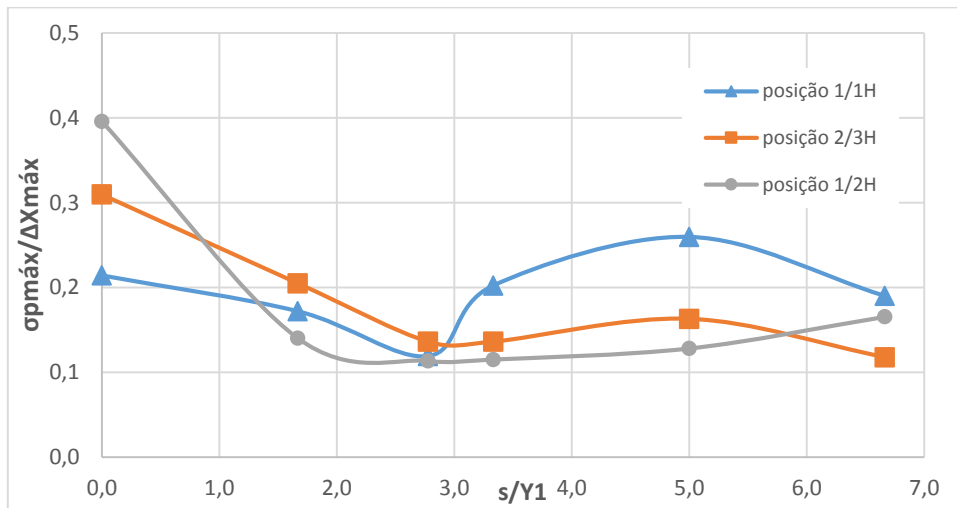
Flutuação de pressão adimensionalizada; $s=6\text{cm}$, posição $1/2H$, inclinação 1:3, $Fr=5,98$

ANEXO VII

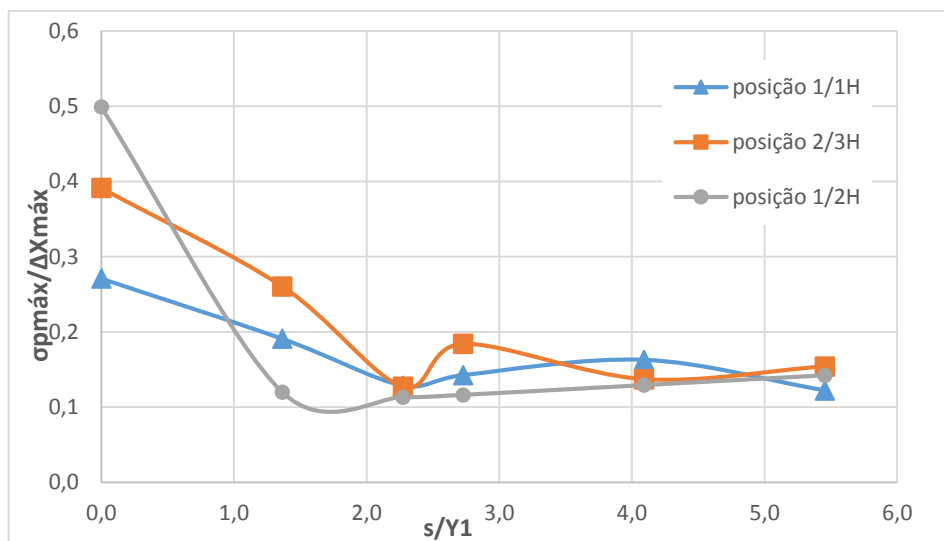
**GRÁFICOS COM OS MENORES VALORES DO
PARÂMETRO ω PARA CADA VAZÃO, POSIÇÃO E
ALTURA DE SOLEIRA**



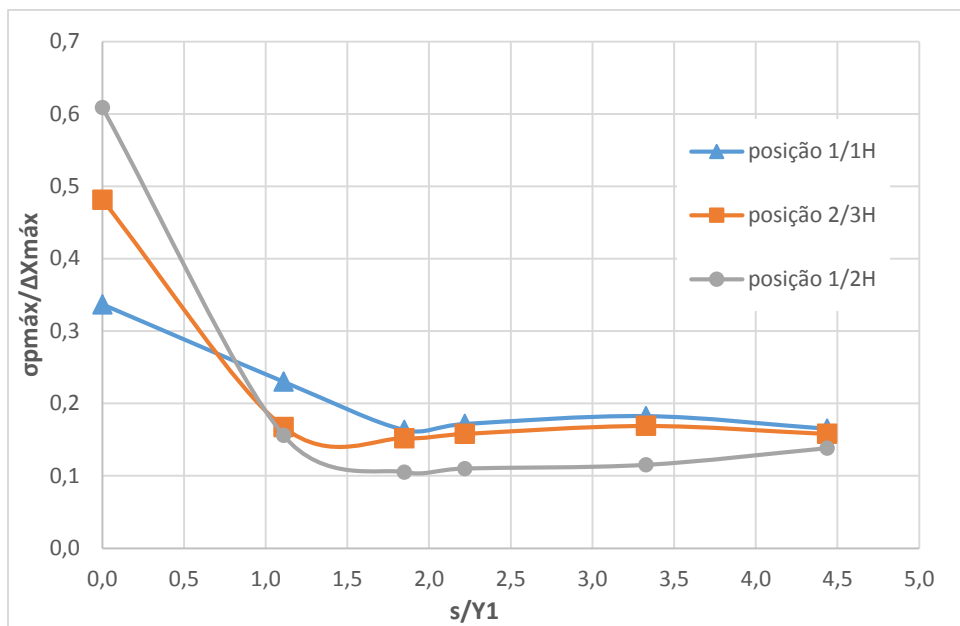
Resultados para a vazão de 40L/s ($Fr=7,44$)



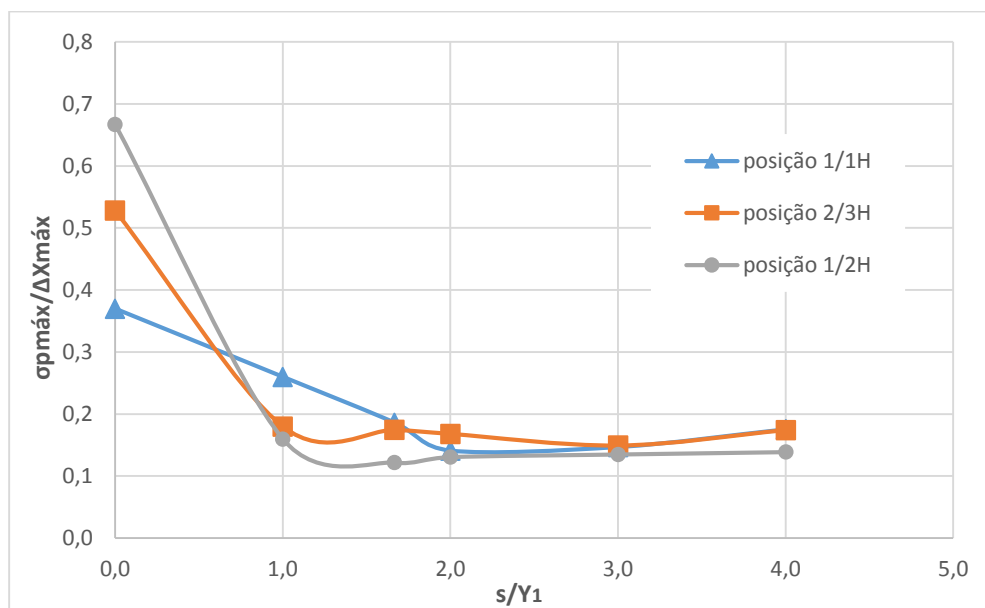
Resultados para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$)



Resultados para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$)



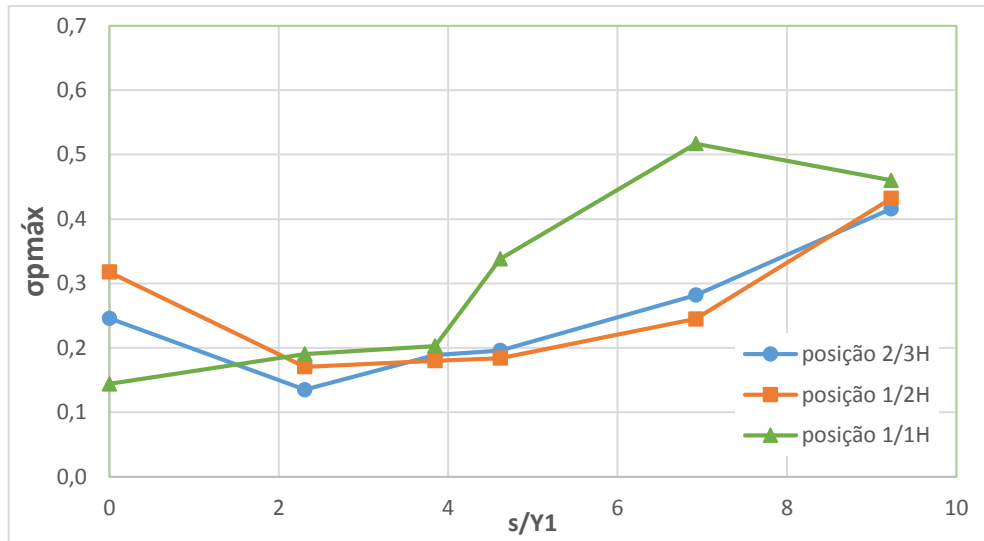
Resultados para a vazão de 100L/s ($Fr=6,34$)



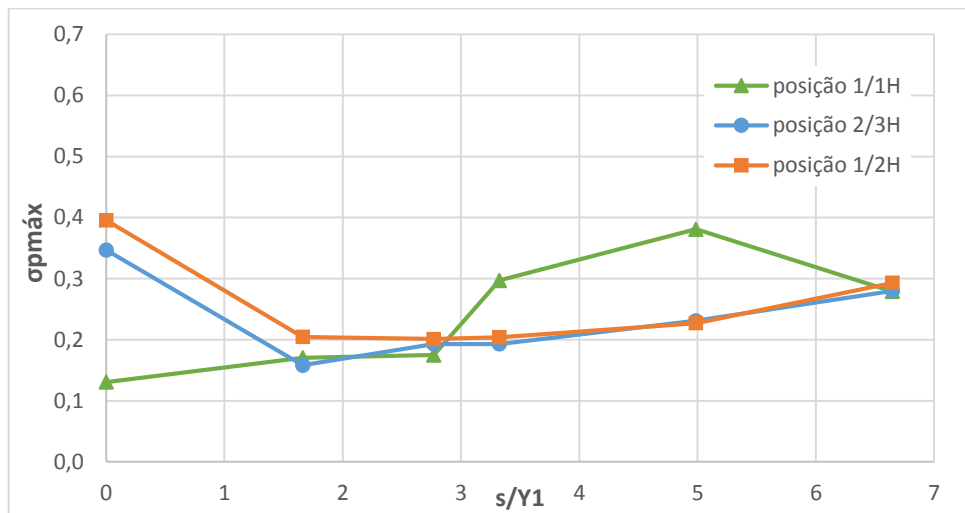
Resultados para a vazão de 110L/s ($Fr=5,98$)

ANEXO VIII

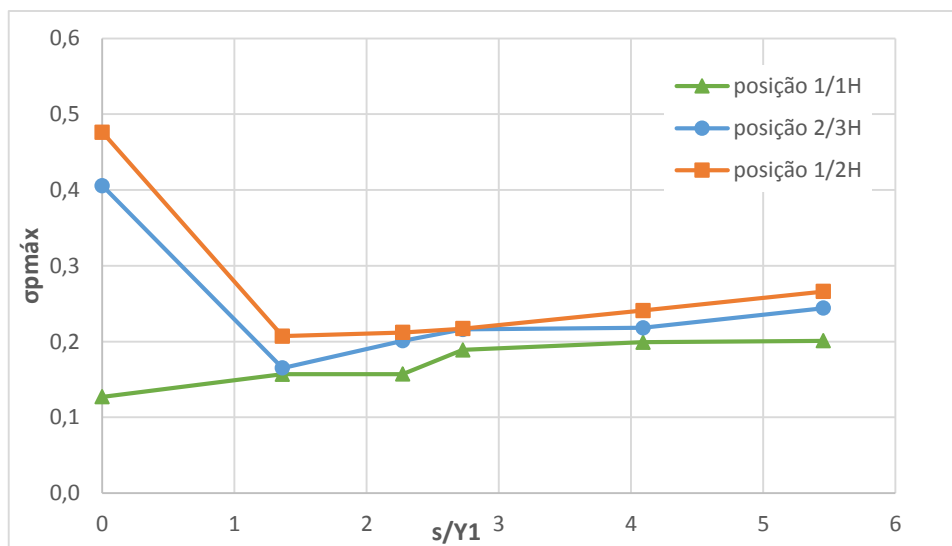
GRÁFICOS COM MENORES VALORES DE FLUTUAÇÃO MÁXIMA, PARA CADA VAZÃO, POSIÇÃO E ALTURA DE SOLEIRA



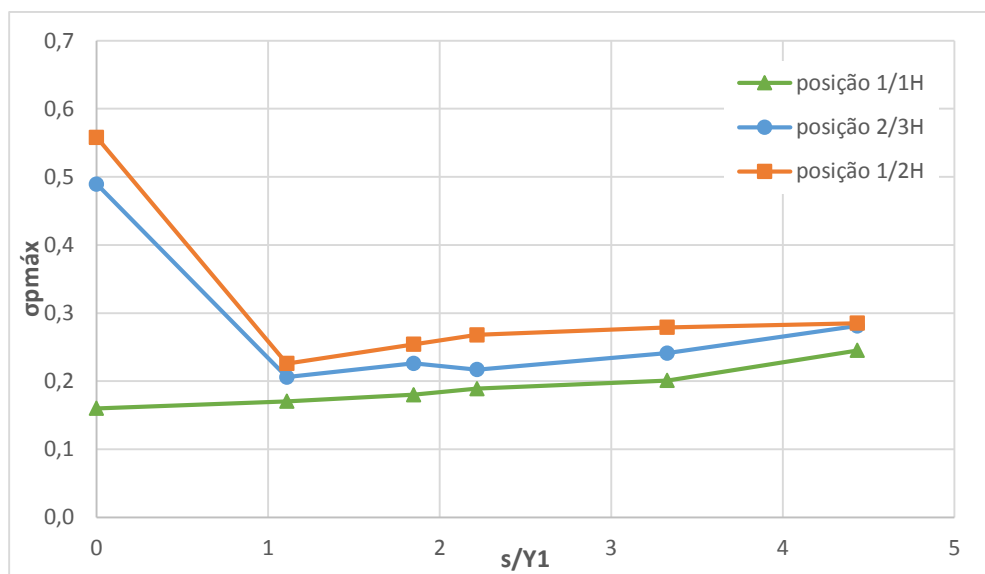
Resultados para a vazão de 40L/s ($Fr=7,44$)



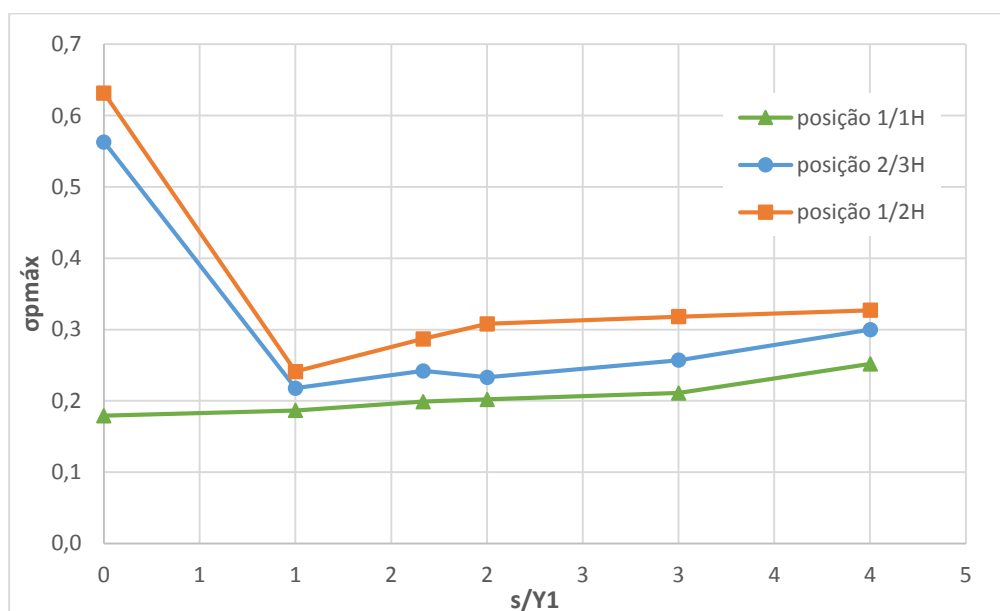
Resultados para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$)



Resultados para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$)



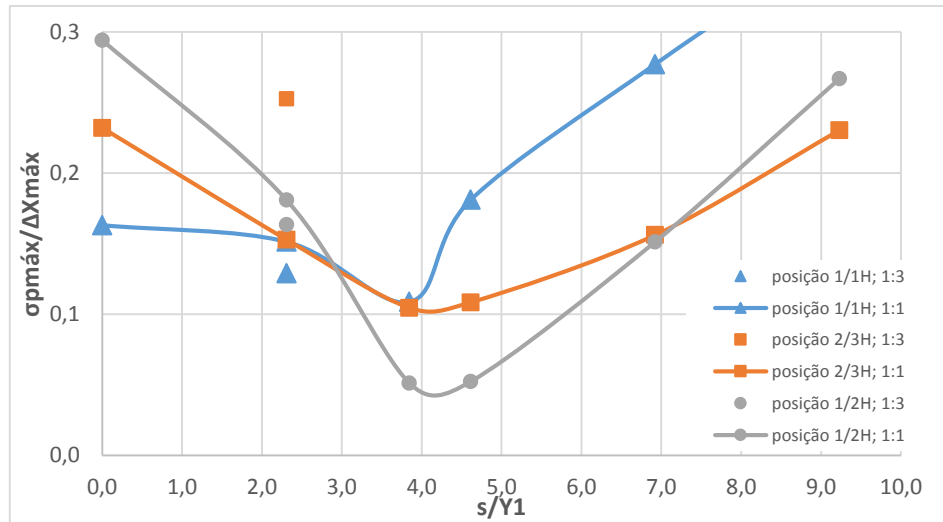
Resultados para a vazão de 100L/s ($Fr=6,34$)



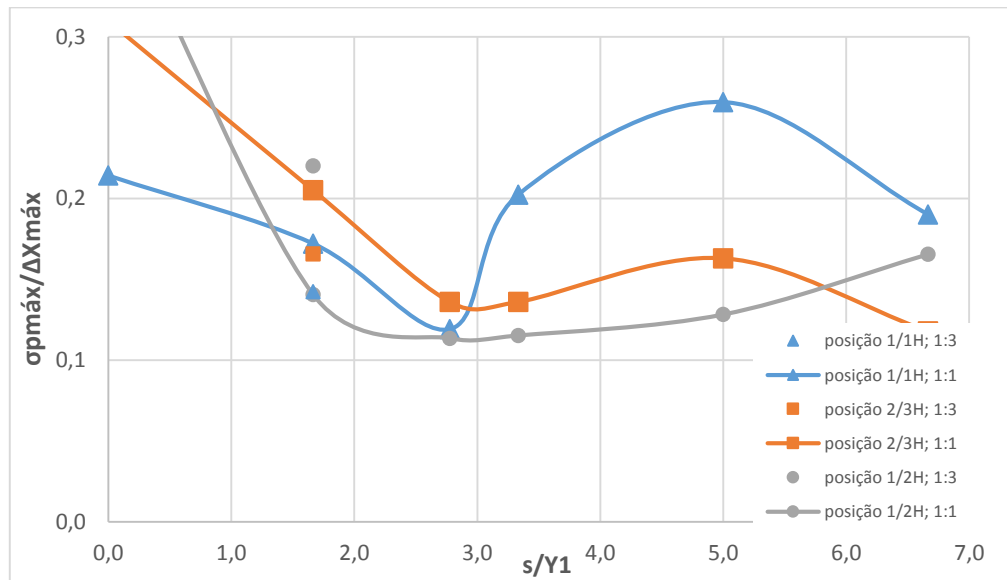
Resultados para a vazão de 110L/s ($Fr=5,98$)

ANEXO IX

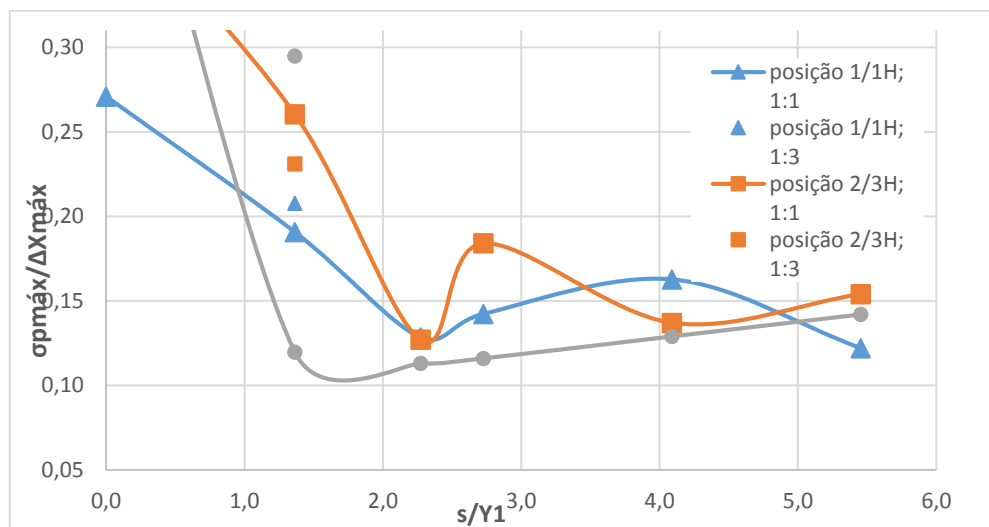
**COMPARAÇÃO DOS MENORES VALORES DO
PARÂMETRO ω , PARA CADA VAZÃO, POSIÇÃO E
INCLINAÇÃO PARA UMA SOLEIRA DE 6 CM DE
ALTURA**



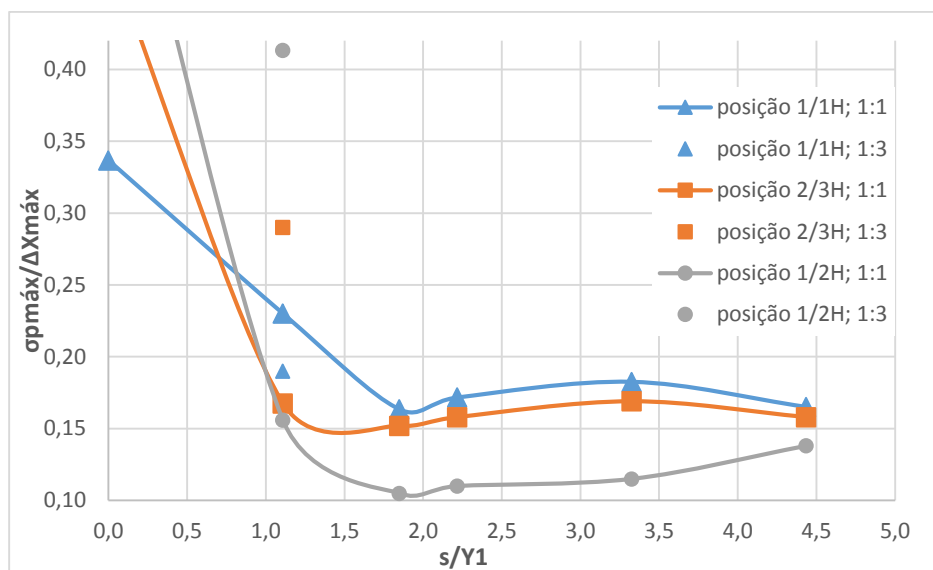
Resultados para a vazão de 40L/s ($Fr=7,44$)



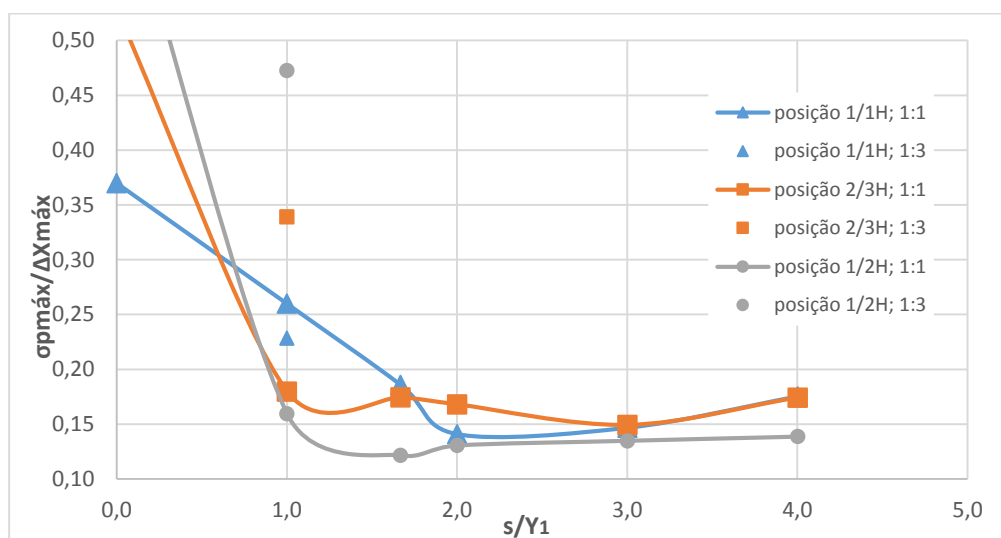
Resultados para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$)



Resultados para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$)



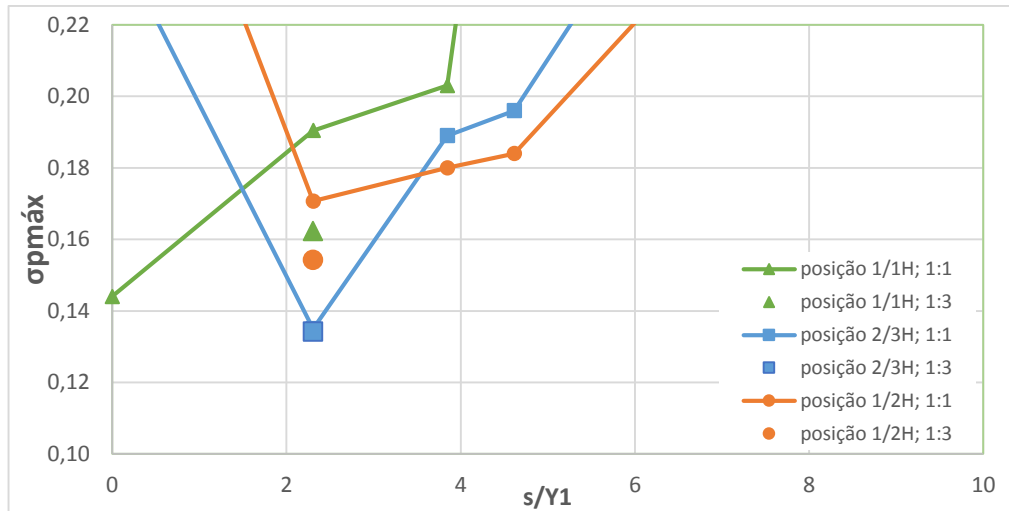
Resultados para a vazão de 100L/s ($Fr=6,34$)



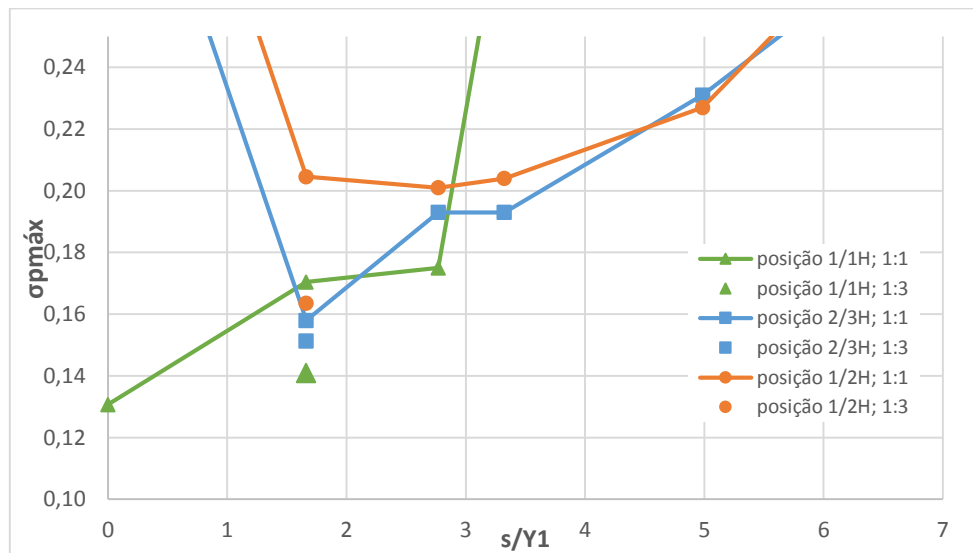
Resultados para a vazão de 110L/s ($Fr=5,98$)

ANEXO X

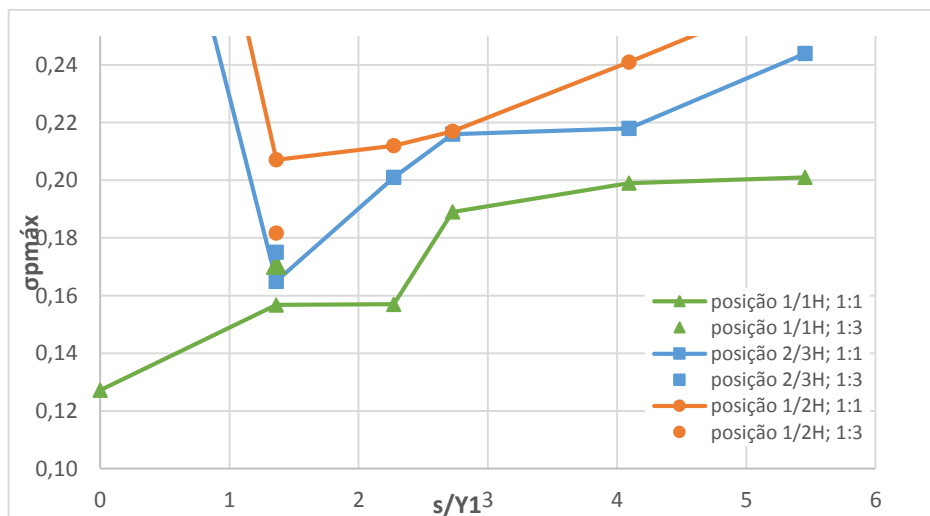
**COMPARAÇÃO DOS MENORES VALORES DE
FLUTUAÇÃO MÁXIMA, PARA CADA VAZÃO,
POSIÇÃO E INCLINAÇÃO PARA UMA SOLEIRA DE 6
CM DE ALTURA**



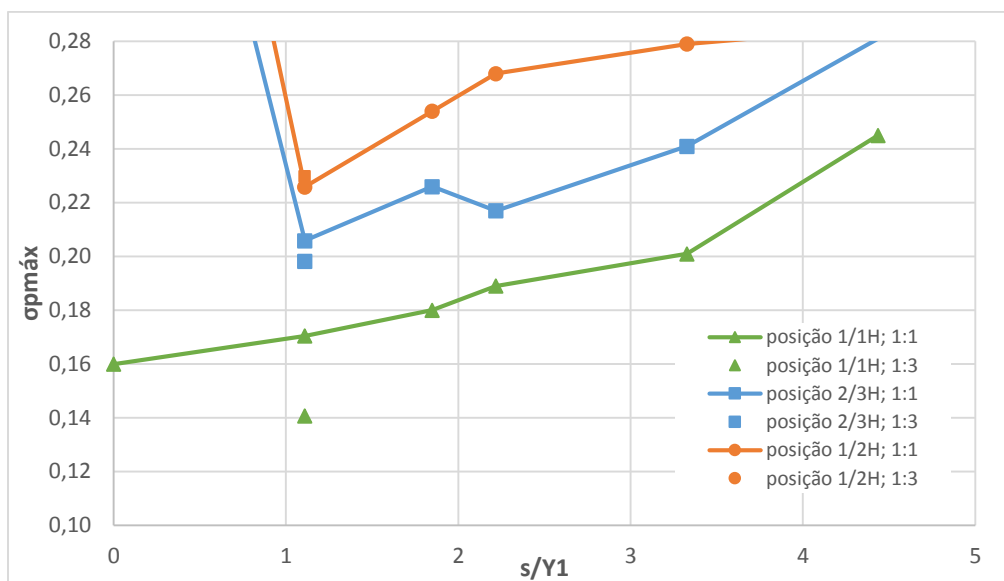
Resultados para a vazão de 40L/s ($Fr=7,44$)



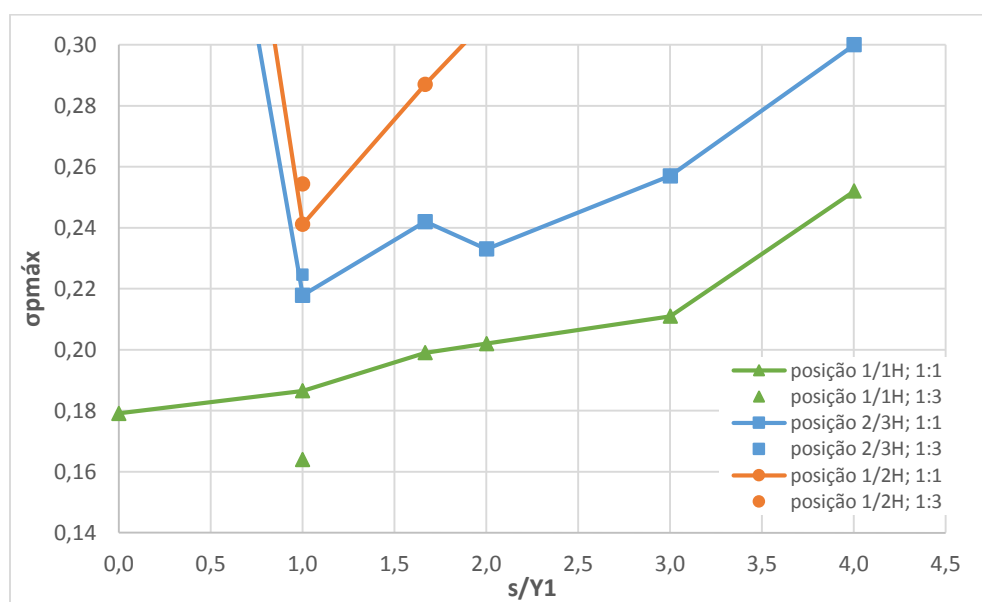
Resultados para a vazão de 60L/s ($Fr=6,98$)



Resultados para a vazão de 80L/s ($Fr=6,91$)



Resultados para a vazão de 100L/s ($Fr=6,34$)



Resultados para a vazão de 110L/s ($Fr=5,98$)