

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

CAROLINA KUHN NOVAKOSKI

ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM
DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR

PORTO ALEGRE

2021

CAROLINA KUHN NOVAKOSKI

ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM
DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Orientador: Marcelo Giulian Marques

Coorientador: Eder Daniel Teixeira

PORTO ALEGRE

2021

Novakoski, Carolina Kuhn
Análise da macroturbulência do escoamento sobre
vertedouro em degraus com aeração induzida por
defletor e câmara de ar / Carolina Kuhn Novakoski. --
2021.
219 f.
Orientador: Marcelo Giulian Marques.

Coorientador: Eder Daniel Teixeira.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Vertedouro em degraus. 2. Aeradores. 3. Aeração
induzida. 4. Pressões extremas. 5. Dissipação de
energia. I. Giulian Marques, Marcelo, orient. II.
Teixeira, Eder Daniel, coorient. III. Título.

CAROLINA KUHN NOVAKOSKI

ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM
DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como
requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira – UFRGS
Co-Orientador

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez – UNICAMP
Examinador

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Maurício Dai Prá – UFRGS
Examinador

Prof. Dr. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos – IST
Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Marcelo Giulian Marques por toda a dedicação desde a graduação até a defesa da presente tese de doutorado e ao meu co-orientador professor Eder Daniel Teixeira pela colaboração e auxílio em diferentes etapas.

Agradeço à toda a equipe do Laboratório de Obras Hidráulicas, professores, bolsistas de pós graduação e de graduação por sua fundamental importância nesse trabalho e também pela amizade ao longo desse trabalho.

Agradeço às valiosas contribuições do professor Dr. Jorge de Saldanha Gonsalves Matos ao longo do trabalho, pela disponibilidade e dedicação.

Agradeço aos meus pais pelo apoio incondicional.

Agradeço à minha família pelo apoio.

Agradeço à Furnas Centrais Elétricas pelo financiamento da pesquisa à qual esse trabalho está vinculado.

Agradeço à CAPES pela bolsa concedida

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de um escoamento sobre turbilhões (fonte: Simões, 2012)	26
Figura 2 – Foto de um escoamento deslizante sobre turbilhões (fonte: www.sulinfoco.com.br/nivel-da-barragem-do-rio-sao-bento-comeca-a-normalizar)	26
Figura 3 – Desenvolvimento do escoamento deslizante sobre turbilhões sobre um vertedouro em degraus. (Adaptado de CHANSON, 1994b)	26
Figura 4 – Resultados experimentais de dissipação de energia com relação à altura da calha obtidos por Sanagiotto (2003) comparados com os de diferentes autores. (fonte: SANAGIOTTO, 2003).....	29
Figura 5 – Posição das tomadas de pressão para ensaio de bidimensionalidade. (fonte: SÁNCHEZ-JUNY, 2001) 29	
Figura 6 – Parâmetros estatísticos das pressões desenvolvidas ao longo da calha em degraus (a) nos patamares e (b) nos espelhos dos degraus. (fonte: adaptado de SÁNCHEZ-JUNY, 2001)	30
Figura 7 – Zonas de início de aeração do escoamento sobre vertedouros em degraus.	31
Figura 8 - Resultados experimentais e modelos teórico-experimentais de Gomes (2006) para os coeficientes de pressões extremas desenvolvidas nos patamares. (fonte: adaptado de GOMES, 2006).....	32
Figura 9 – Coeficiente de pressões extremas (P 0,1% e P 99,9%) nos espelhos dos degraus (fonte: OSMAR, 2016).	33
Figura 10 - Coeficiente de pressões extremas (P 0,1% e P 99,9%) nos patamares dos degraus (fonte: OSMAR, 2016).....	33
Figura 11 – Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência (fonte: CANELLAS, 2020)	34
Figura 12 – Perfis de concentração de ar para diversas seções transversais ao longo da calha em degraus para as vazões: a) 80 l/s e b) 200 l/s. (fonte: MATOS, 1999)	37
Figura 13 – Colapso de uma bolha de vapor, (a) próximo a uma superfície, (b) pura. (fonte: adaptado de FALVEY, 1990).....	38
Figura 14 – Desenvolvimento da cavitação. (fonte: FALVEY, 1990)	39
Figura 15 – Prejuízos ocasionados pela cavitação na barragem de Karum. (fonte: SIMÕES, 2008 E SIMÕES 2012).	40
Figura 16 – Contagem de ruído associado à cavitação adimensionalizada em função do índice de cavitação calculado pela Equação 23 (fonte: FRIZELL et al. 2013)	42
Figura 17 – Imagens obtidas por câmera de alta velocidade para as condições de: (a) $K=50,8$ mm, $\sigma = 0,39$ e $\phi=21,8^\circ$; (b) $K=25,4$ mm, $\sigma=0,37$ e $\phi= 21,8^\circ$; (c) $K=50,8$ mm, $\sigma=0,67$ e $\phi = 68,2^\circ$; (d) $K=25,4$ mm, $\sigma = 0,63$ e $\phi = 68,2^\circ$ (fonte: FRIZELL et al., 2013).....	42
Figura 18 – Danos (a, c e d) e reparos (b) reparos removido pelo escoamento na UHE Dona Francisca. (fonte: fotos cedidas por Dona Francisca Energética S.A.).....	44
Figura 19 – Esquema do modelo utilizado por Peterka (1953) para realização de seus ensaios (fonte: PETERKA, (1953))	46
Figura 20 – Concentração de ar em função da perda de massa de corpos de prova de concreto. (fonte: PETERKA (1953)	46
Figura 21 – Relação das pressões e do coeficiente de cavitação com a concentração de ar no escoamento segundo Dong et al.(2007) (fonte: DONG et al., 2007)	47
Figura 22 – Tipos de aeradores (fonte: adaptado de VOLKART e RUTSCHMANN, 1984).	49
Figura 23 – Processo de entrada de ar através de um aerador do tipo defletor (fonte: adaptado de VOLKART e RUTSCHMANN, 1984).	49
Figura 24 – Métodos de propiciar a continuidade da entrada de ar em aeradores (fonte: Adaptado de FALVEY, 1990).....	49
Figura 25 – Esquema do modelo utilizado por Pfister (2006a), (a) tipos de defletores e (b) zonas de escoamento. (Fonte: PFISTER, 2006a).....	55
Figura 26 - Concentração de ar em função das zonas relacionadas na Figura 25 (fonte: PFISTER et al., 2006). ..	55
Figura 27 – Concentrações de ar médias no fundo da calha obtidas por Pfister (2006a) (fonte: PFISTER, 2006a)	56
Figura 28 – Esquema do modelo utilizado por pfister et al. 2005. (fonte: Pfister et al, 2005)	57

Figura 29 – Características da concentração de ar: (a) Concentração de ar ao longo de x medida a 3 e 5 mm do pseudo-fundo nas quinas dos degraus, (b) Concentração de ar relativa C_b/C_{au} ao longo da calha.	57
Figura 30 – Modelo de vertedouro em degraus com aeração induzida estudado por Wang et al. (2012). (fonte: Wang et al., 2012).....	58
Figura 31 – defletores testados por Mojtaba et al. (2015). (fonte: adaptado de Mojtaba et al., 2015).....	59
Figura 32 – comportamento do escoamento obtido por Terrier (2016) (fonte: adaptado de Terrier (2016)).....	60
Figura 33 – Concentrações de ar no fundo do canal ao longo do calha obtidas por Terrier (2016) (fonte: TERRIER, 2016).....	61
Figura 34 - Concentrações de ar no fundo do canal ao longo do calha obtidas por Terrier (2016) comparadas com Pfister (2006a) (fonte: TERRIER, 2016).	61
Figura 35 – Regiões do escoamento definidas por Novakoski et al. (2020) (fonte: adaptado de NOVAKOSKI et al., 2020).....	62
Figura 36 – Modelo de vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares utilizado por Priebe (2020) (fonte: PRIEBE, 2020).....	63
Figura 37 – Escoamento sobre vertedouro em degraus em conjunto com pilares em forma de X (fonte: adaptado de Dong et al., 2019).	64
Figura 38 – Índice de cavitação e concentração de ar obtidos por Dong et al. (2019) para os três casos estudados pelos autores (fonte: adaptado de DONG et al., 2019).....	64
Figura 39 – Comportamento do escoamento segundo diferentes autores (fonte: adaptado de PFISTER, 2006a, TERRIER, 2016 e NOVAKOSKI, 2020).....	65
Figura 40 – esquema dos aerados utilizados no modelo de Zamora et al. (2008). (fonte: adaptado de Zamora et al. (2008))	67
Figura 41 – Dissipação de energia para escoamento sobre vertedouro em degraus com e sem aeração induzida. (fonte: Zamora(2008).	67
Figura 42 – coeficiente de resistência em função da concentração de ar em um escoamento. (fonte: adaptado de Wood (1991)).....	68
Figura 43 – Modelo numérico utilizado por Arantes (2007). (fonte: adaptado de Arantes (2007)).....	69
Figura 44 – Velocidades e energia específica do escoamento obtidas por Arantes (2007). (Fonte: adaptado de ARANTES, 2007).....	69
Figura 45 – Comparação entre os dados de dissipação de energia de Arantes (2007) e Zamora (2008).	71
Figura 46- Principais características dos três modelos físicos utilizados.	74
Figura 47 – Esquema da metodologia adotada.	75
Figura 48 – esquema do sistema aerador no LOH II, (a) vista lateral e (b) vista frontal	76
Figura 49 – Defletores utilizados para ensaios com aeração induzida no modelo LOH II.	76
Figura 50 – Pontos característicos do escoamento: (a) ponto de impacto do jato; (b) Pontos de início intermitente da aeração superior e ponto de início de aeração superior e inferior e (c) Local onde as aerações superior e inferior se encontram.	77
Figura 51 – Tubo de Pitot Prandtl com transmissor de pressão	79
Figura 52 – Posição de medição do tubo de pitot prandtl na tubulação de entrada da câmara de ar.	79
Figura 53 – Zonas do escoamento com aeração induzida com defletor e câmara de ar posicionados no degrau 1.	81
Figura 54 – Formação do núcleo de blackwater no escoamento.	82
Figura 55 –Distribuição da concentração de ar no escoamento na zona de Blackwter.....	82
Figura 56 – Medida de h_{90} no escoamento.....	84
Figura 57 – alturas do escoamento h_{90} na aeração induzida e h_{eq} na aeração natural para a vazão de 150 l/s.	84
Figura 58 – Defletores utilizados no modelo LOH I além dos mesmos utilizados no modelo LOH II.	85
Figura 59 – Alturas de lâminas d'água medidas no modelo LOH I para análise da dissipação de energia.....	86
Figura 60 – Aquisição de dados de pressão, (a) instalação do transdutor na bacia de dissipação e (b) sistema de aquisição de dados.	89
Figura 61 – Parâmetros utilizados para a Equação 70.....	90
Figura 62 – Características do escoamento e simbologia dos parâmetros utilizados.	91
Figura 63 - Número adimensional de Reynolds do escoamento no modelo LOH I	93

Figura 64 - Números adimensionais do escoamento no modelo LOH II, (a) $Re(L_{jet}) \times Fr_o$, (b) $We(L_{jet}) \times Fr_o$, (c) $Re(h_o)$, $We(h_o)$.	95
Figura 65- Características do escoamento para o modelo LOH II (a) Impacto do jato no patamar (b) Início do escoamento gradualmente uniforme e (c) ponto de final da blackwater.	98
Figura 66 – Posições características do escoamento com aeração induzida o modelo LOH II.	99
Figura 67 - características do escoamento para o modelo LOH II adimensionalizadas.	100
Figura 68 – Comprimento de início de aeração (a) aeração induzida e (b) aeração natural.	102
Figura 69 – Comparação entre o comprimento de início de aeração superior para aeração induzida com o comprimento de início de aeração para escoamento com aeração natural.	102
Figura 70 – Pressões desenvolvidas para escoamento com o defletor t10 b0, (a), (c) e (e) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ nos patamares dos degraus e (b) (d) e (f) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ nos espelhos dos degraus.	105
Figura 71 – Pressões médias nos patamares dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	107
Figura 72 – $P_{0,1\%}$ nos patamares dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	108
Figura 73 – $P_{99,9\%}$ nos patamares dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	108
Figura 74 – Pressões médias nos espelhos dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	110
Figura 75– $P_{0,1\%}$ nos espelhos dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	111
Figura 76 – $P_{99,9\%}$ nos espelhos dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	111
Figura 77 – Patamar e espelho com pico de pressão.	113
Figura 78 – esquema do comportamento de $P_{0,1\%}$ em escoamento com aeração induzida em relação ao escoamento com aeração natural.	114
Figura 79 – $P_{0,1\%}$ para os defletores t10 b0 e vazões superiores a $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ adimensionalizadas.	115
Figura 80 – Ajuste $P_{0,1\%}$.	115
Figura 81 – Coeficientes de demanda de ar para as diferentes geometrias de defletores testadas.	116
Figura 82 – Valores de coeficiente de demanda de ar comparados com os valores de Terrier (2016).	117
Figura 83 – β calculado x β medido	117
Figura 84- concentração de ar pelo método Qar x haer para as vazões (a) $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0,300 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0,400 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (d) $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	119
Figura 85 -- concentração de ar pelos métodos P x hnaer e haer x hnaer para as vazões (a) $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0,300 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0,400 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (d) $0,500 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	121
Figura 86 – Concentração de ar média e de fundo para o defletor t10 b0 para a vazão de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	123
Figura 87 – Concentração de ar no fundo para ambos os métodos para o defletor t10 b0 e vazão de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	124
Figura 88 – Concentração de ar no fundo para a totalidade da calha para o defletor t10 b0 e vazão de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	124
Figura 89 - Concentração de ar no fundo da calha para todas as vazões ensaiadas para o defletor t 10b0.	125
Figura 90 – Concentração de ar no fundo da calha para todas as vazões ensaiadas para o defletor t 10b21.	125
Figura 91 – $C_b \times P_{0,1\%}$ para o defletor t10 b0 e vazões (a) $0,2 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0,3 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0,4 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (d) $0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	127
Figura 92 - $C_b \times P_{0,1\%}$ para o defletor t10 b21,5 e vazões (a) $0,3 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0,4 \text{ m}^3/\text{s/m}$ e (c) $0,5 \text{ m}^3/\text{s/m}$.	128
Figura 93 – Comprimento do ressalto hidráulico (a) valores dimensionais e (b) valores adimensionais.	129
Figura 94 - Ressaltos hidráulicos visualizados para a vazão de 60 l/s .	130
Figura 95 – Pressões médias desenvolvidas no pé do vertedouro, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.	131
Figura 96 – energia na entrada do ressalto hidráulico, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.	132
Figura 97 - Energia na saída do ressalto hidráulico, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.	132

<i>Figura 98 - – Energia dissipada no ressalto hidráulico, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 99 - Energia dissipada na calha do vertedouro, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 100 – Energia dissipada na calha para as situações de aeração induzida com o defletor t10 b0 e t10 b21,5 e com aeração natural para a vazão de 0,300m³/s/m.....</i>	<i>134</i>
<i>Figura 101 - Comparação dos dados de dissipação de energia obtidos no modelo LOH I e LOH II com os dados de Zamora</i>	<i>135</i>
<i>Figura 102 - Comparação dos dados de dissipação de energia obtidos com os dados de Zamora (2009 (a)) dados do modelo LOH I e (b) dados do modelo LOH II.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 103 – Foto do modelo LAHE</i>	<i>148</i>
<i>Figura 104 - sistema de indução de ar no modelo LAHE, (a) foto e (b) esquema</i>	<i>149</i>
<i>Figura 105 – Abertura no espelho do primeiro degrau com o objetivo de permitir a entrada de ar para o escoamento.</i>	<i>149</i>
<i>Figura 106 – montagem do sistema de tranquilização do escoamento.....</i>	<i>149</i>
<i>Figura 107 – Sistema de abastecimento de água do modelo LAHE.</i>	<i>149</i>
<i>Figura 108 – Posição das tomadas de pressão no modelo LAHE.....</i>	<i>150</i>
<i>Figura 109 – Foto do modelo LOH I.</i>	<i>151</i>
<i>Figura 110 – Sistema de indução de ar no modelo LOH I, (a) foto e (b) esquema.....</i>	<i>151</i>
<i>Figura 111 – foto da abertura do primeiro degrau para permitir a entrada de ar para o interior do escoamento.</i>	<i>152</i>
<i>Figura 112 – Tranquilização do escoamento no modelo LOH I.</i>	<i>152</i>
<i>Figura 113 – defletores utilizados no modelo LOH I.....</i>	<i>152</i>
<i>Figura 114 – Foto do modelo físico utilizado para os ensaios</i>	<i>154</i>
<i>Figura 115 – Foto e esquema do sistema de indução de ar no modelo LOH II.</i>	<i>154</i>
<i>Figura 116 – foto da abertura no espelho do degrau para fornecimento de ar no modelo LOH II.</i>	<i>155</i>
<i>Figura 117 – Tranquilização do escoamento.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 118 – Terceira opção de defletores sugeridos para ensaios com aeração induzida no modelo LOH II. ...</i>	<i>155</i>
<i>Figura 119 – Sistema de bombeamento do laboratório de obras hidráulicas.....</i>	<i>155</i>
<i>Figura 120 – Posição das tomadas de pressão nos degraus do modelo LOH II.....</i>	<i>156</i>
<i>Figura 121 – Instalação e características dos defletores.....</i>	<i>157</i>
<i>Figura 122 – Defletores determinados para o modelo LOH II</i>	<i>158</i>
<i>Figura 123 – Defletores determinados para o modelo LAHE.....</i>	<i>158</i>
<i>Figura 124 – Segunda opção de defletores sugeridos para ensaios com aeração induzida no modelo LOH II. ..</i>	<i>160</i>
<i>Figura 125 - Segunda opção de defletores sugeridos para ensaios com aeração induzida no modelo LAHE.</i>	<i>160</i>
<i>Figura 126 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 15 mm para vazão de (a) 0,1 m³/s/m e (b) 0,355 m³/s/m.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 127 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 18 mm para vazão de (a) 0,1 m³/s/m e (b) 0,355 m³/s/m.....</i>	<i>161</i>
<i>Figura 128 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 27 mm para vazão de (a) 0,1 m³/s/m e (b) 0,355 m³/s/m.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 129 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 27 mm para vazão de (a) 0,1 m³/s/m e (b) 0,355 m³/s/m.....</i>	<i>162</i>
<i>Figura 130 - Comparação entre os resultados de pressões extremas com 0,1% de probabilidade de não excedências nos espelhos para os ensaios com aeração natural e com defletores de 15, 18, 27 e 36 mm para vazão de (a) 0,100 m³/s/m, (b) 0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m e (g) 0,355 m³/s/m no modelo LAHE.....</i>	<i>164</i>
<i>Figura 131 – esquema da nova geometria dos defletores.</i>	<i>166</i>
<i>Figura 132 - Conexão dos transdutores na calha em degraus e caixa e sistema de aquisição utilizados</i>	<i>167</i>
<i>Figura 133 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – pressões médias - transdutor OM 8 – degrau 7.</i>	<i>170</i>
<i>Figura 134 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão - desvios padrão - transdutor OM 8 – degrau 7.</i>	<i>170</i>

<i>Figura 135 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – pressões médias - transdutor OM16 – degrau 15.</i>	<i>170</i>
<i>Figura 136 – Determinação de tempo de aquisição de pressão – desvios padrão – transdutor OM16 – degrau 15.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 137 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão - pressões médias - transdutor SN14 – degrau 29.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 138 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – desvios - transdutor SN14 – degrau 29.</i>	<i>171</i>
<i>Figura 139 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – pressões medias - transdutor SN19 – degrau 40.</i>	<i>172</i>
<i>Figura 140 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – desvios - transdutor SN19 – degrau 40.</i>	<i>172</i>
<i>Figura 141 – Diagrama de Pearson (fonte: Lhamas, 1987)</i>	<i>173</i>
<i>Figura 142 – Dados obtidos para o transdutor OM8 – degrau 7, plotados no diagrama de Pearson.....</i>	<i>173</i>
<i>Figura 143 – Dados obtidos para o transdutor OM16 – degrau 15, plotados no diagrama de Pearson.</i>	<i>174</i>
<i>Figura 144 – Dados obtidos para o transdutor SN14 – degrau 15, plotados no diagrama de Pearson.</i>	<i>174</i>
<i>Figura 145 – Dados obtidos para o transdutor SN19 – degrau 40, plotados no diagrama de Pearson.</i>	<i>175</i>
<i>Figura 146 – Ensaio sendo realizado cm piezômetros no modelo LAHE.....</i>	<i>176</i>
<i>Figura 147 – Comparação valores de pressões médias obtidos por pizômetros e transdutores de pressão para os patamares dos degraus no modelo LAHE com defletor de 15 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b)0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.</i>	<i>178</i>
<i>Figura 148 - Comparação valores de pressões médias obtidos por pizômetros e transdutores de pressão para os espelhos dos degrausdo modelo LAHE com defletor de 15 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b)0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.</i>	<i>179</i>
<i>Figura 149 - Comparação valores de pressões médias obtidos por pizômetros e transdutores de pressão para os patamares dos degraus do modelo LAHE com defletor de 18 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b)0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.</i>	<i>180</i>
<i>Figura 150 - Comparação valores de pressões médias obtidas por pizômetros e transdutores de pressão para os espelhos dos degraus do modelo LAHE com defletor de 18 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b)0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.</i>	<i>181</i>
<i>Figura 151 - Comparação valores de pressões médias obtidas por pizômetros e transdutores de pressão para os patamares dos degraus do modelo LAHE com defletor de 27 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b)0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.</i>	<i>182</i>
<i>Figura 152 - Comparação valores de pressões médias obtidas por pizômetros e transdutores de pressão para os espelhos dos degraus do modelo LAHE com defletor de 27 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b)0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.</i>	<i>183</i>
<i>Figura 153 – Tubo de Pitot Prandtl com transmissor de pressão</i>	<i>185</i>
<i>Figura 154 – Anemômetro de hélice.....</i>	<i>185</i>
<i>Figura 155 – Posição de medição de cada equipamento testado para aquisição da velocidade média de entrada de ar pela câmara de ar.</i>	<i>185</i>
<i>Figura 156 – Comparação dos resultados do tubo de Pitot e aanamômetro de hélice.....</i>	<i>186</i>
<i>Figura 157 – Perfil do escoamento de ar medido da esquerda para a direita e da direita para a esquerda</i>	<i>186</i>
<i>Figura 158 – Resultados do tubo de Pitot em dias diferentes e com vazões crescentes e decrescentes.</i>	<i>186</i>
<i>Figura 159 – Comparação dos resultados do tudo de Pitot do LOH e do laboratório de mecânica dos Fluidos.</i>	<i>186</i>
<i>Figura 160 – Velocidade média de entrada de ar pelo tubo da câmara de ar (m/s).....</i>	<i>187</i>
<i>Figura 161 –Distribuição da concentração de ar no escoamento na zona de Blackwter</i>	<i>188</i>
<i>Figura 162 – medição dasalturas de lâmina d’água no escoamento com aeração natural na zona não aerada.</i>	<i>190</i>
<i>Figura 163 – Relação entre as pressões médias nos patamares dos degraus e a altura da lâmina d’água com as três adimensionalizações testadas.</i>	<i>191</i>
<i>Figura 164 - Comparação entre h medido e h calculado com as diferentes adimensionalizações para as vazões ensaiadas: a) 41 l/s; b) 54 l/s; c) 75 l/s; d) 100 l/s; d) 150 l/s; e) 200 l/s e f) 250 l/s.</i>	<i>192</i>

Figura 165 – erros calculados para as adimensionalizações testadas, a) de forma completa; b) detalhe na região de erros com valores máximos de 40%.....	193
Figura 166 – Energia de montante calculada através da Equação 53 e Equação 62.	194
Figura 167 – Energia dissipada na calha no modelo LOH I com dos os defletores e energia dissipada no modelo LOH II com o defletor t10 b0 para o degrau 32.	195
Figura 168 – Pressões desenvolvidas nos patamares dos degraus, (a), (c) e (e) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ e para o defletor t10 b12,5 e (b) (d) e (f) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ para o defletor t10 b21,5.	196
Figura 169 – Pressões desenvolvidas nos espelhos dos degraus, (a), (c) e (e) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ e para o defletor t10 b12,5 e (b) (d) e (f) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ para o defletor t10 b21,5.	197
Figura 170 – Relação da subpressão obtida no patamar do espelho 2 com as vazões ensaiadas em valores adimensionais ($\Delta p/h_0$) (a) e em valores dimensionais (b).	198
Figura 171 – Pressões médias nos patamares dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m ³ /s/m, (b) 0,108 m ³ /s/m, (c) 0,150 m ³ /s/m, (d) 0,200 m ³ /s/m, (e) 0,300 m ³ /s/m, (f) 0,400 m ³ /s/m e (g)0,500 m ³ /s/m	200
Figura 172 – P01% nos patamares dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m ³ /s/m, (b) 0,108 m ³ /s/m, (c) 0,150 m ³ /s/m, (d) 0,200 m ³ /s/m, (e) 0,300 m ³ /s/m, (f) 0,400 m ³ /s/m e (g)0,500 m ³ /s/m	202
Figura 173 – P99,9% nos patamares dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m ³ /s/m, (b) 0,108 m ³ /s/m, (c) 0,150 m ³ /s/m, (d) 0,200 m ³ /s/m, (e) 0,300 m ³ /s/m, (f) 0,400 m ³ /s/m e (g)0,500 m ³ /s/m	203
Figura 174 – Pressões médias nos espelhos dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m ³ /s/m, (b) 0,108 m ³ /s/m, (c) 0,150 m ³ /s/m, (d) 0,200 m ³ /s/m, (e) 0,300 m ³ /s/m, (f) 0,400 m ³ /s/m e (g)0,500 m ³ /s/m	205
Figura 175 – P01% nos espelhos dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m ³ /s/m, (b) 0,108 m ³ /s/m, (c) 0,150 m ³ /s/m, (d) 0,200 m ³ /s/m, (e) 0,300 m ³ /s/m, (f) 0,400 m ³ /s/m e (g)0,500 m ³ /s/m.	206
Figura 176 – P99,9% nos espelhos dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m ³ /s/m, (b) 0,108 m ³ /s/m, (c) 0,150 m ³ /s/m, (d) 0,200 m ³ /s/m, (e) 0,300 m ³ /s/m, (f) 0,400 m ³ /s/m e (g)0,500 m ³ /s/m.	208
Figura 177 –Comportamento de $P_{0,1\%}$ para as vazões a) 0,2 m ³ /s/m, b) 0,3 m ³ /s/m, c) 0,4 m ³ /s/m e d) 0,5 m ³ /s/m.....	210
Figura 178 – Limite inferior de aplicação do método de Wood (1984 apud MATOS, 1999) para o defletor t10 b0 para as vazões (a) 0,300 m ³ /s/m, (b) 0,400 m ³ /s/m, (c) 0,500 m ³ /s/m.	211
Figura 179– Limite inferior de aplicação do método de Wood (1984 apud MATOS, 1999) para o defletor t10 b12,5 para as vazões (a) 0,300 m ³ /s/m, (b) 0,400 m ³ /s/m, (c) 0,500 m ³ /s/m.	211
Figura 180 – Concentração de ar no fundo na totalidade da calha para o defletor t10 b0 para as vazões (a) 0,300 m ³ /s/m, (b) 0,400 m ³ /s/m e (c) 0,500 m ³ /s/m.	212
Figura 181 Concentração de ar no fundo na totalidade da calha para o defletor t10 b21,5 para as vazões (a) 0,300 m ³ /s/m, (b) 0,400 m ³ /s/m e (c) 0,500 m ³ /s/m.	212
Figura 182 – Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 40 l/s.....	213
Figura 183 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 50 l/s.	214
Figura 184 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 80 l/s.	215
Figura 185 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 100 l/s.	216
Figura 186 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 110 l/s.	217
Figura 187 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 132 l/s.	218
Figura 188 – dissipação de energia para o modelo LOH II para as vazões específicas (a) 0,054 m ³ /s/m, (b) 0,082 m ³ /s/m, (c) 0,108 m ³ /s/m, (d) 0,150 m ³ /s/m, (e) 0,200 m ³ /s/m, (f)0,300 m ³ /s/m e (e) 0,500m ³ /s/m.)	219

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1 – Barragens com vertedouros em degraus existentes no Brasil</i>	24
<i>Tabela 2 – Equações para concentração de ar em escoamento com aeração natural.</i>	36
<i>Tabela 3 – Resumo das vazões limites para ocorrência de cavitação de acordo com diferentes autores.</i>	43
<i>Tabela 4 – Concentração de ar necessária para evitar danos por cavitação relacionada com a resistência do concreto (fonte: adaptado de Semenkov e Lentyaev, 1973).</i>	46
<i>Tabela 5 – Equações para demanda relativa de ar</i>	53
<i>Tabela 6 – Equações para estimativa da posição de impacto do jato para aeração induzida em calha lisa.</i>	54
<i>Tabela 7 – Equações para concentração de ar e posição das regiões no escoamento segundo Pfister et al. (2006).</i>	56
<i>Tabela 8 – Coeficientes a e b para Equação 41.</i>	62
<i>Tabela 9 – Dados dos modelos de Pfister et al. (2006b), Zamora (2008), Boes e Hager (2003) e Arantes (2007)</i>	70
<i>Tabela 10 – Números de Reynolds e Weber limites para evitar significantes efeitos de escala em modelos físicos de acordo com diferentes autores. (fonte: adaptado de PFISTER e HAGER, 2010a e PFISTER e CHANSON, 2014, TERRIER, 2016)</i>	73
<i>Tabela 11 - Número de Froude e Reynolds (calculados com $L_{ref} = h_o$ para todos os ensaios realizado).</i>	92
<i>Tabela 12 – vazões em modelo e protótipo para o modelo LOH I</i>	93
<i>Tabela 13 – Númerod de Froude, Reynolds e Weber (calculados com $L_{ref} = h_o = L_{ref} = h$ para todos os ensaios realizados.</i>	93
<i>Tabela 14 - Números de Reynolds e Weber (calculados com $L_{ref} = L_{jet}$) para todos os ensaios realizados.</i>	94
<i>Tabela 15 – vazões em modelo e protótipo para o modelo LOH II</i>	95
<i>Tabela 16 – Pontos característicos do escoamento para todos os ensaios realizados, segundo análises visuais.</i>	97
<i>Tabela 17 – Coeficientes ajustes $P_{0,1\%}$.</i>	115
<i>Tabela 18 – Parâmetros para comparação com dados de Terrier (2016)</i>	118
<i>Tabela 19 – Configuração dos transdutores para os ensaios com aeração induzida no modelo LAHE.</i>	159
<i>Tabela 20 – Vazões ensaiadas nos três modelos utilizados na presente pesquisa.</i>	159
<i>Tabela 21 – Alcance do jato para os defletores testados no modelo LAHE para todas as vazões testadas.</i>	162
<i>Tabela 22 – Configuração dos transdutores para os ensaios com aeração induzida no modelo LOH II.</i>	168
<i>Tabela 23 – Degraus e transdutores utilizados para o ensaio para verificação do tempo de aquisição de dados de pressão.</i>	169

LISTA DE SÍMBOLOS

- α – coeficiente de coriolis;
- β – demanda relativa de ar;
- β_1 e β_2 – coeficientes do diagrama de Pearson;
- β' – parâmetro da distribuição de concentração de ar;
- γ – peso específico da água (N/m^3);
- $\gamma' \cos \theta$ – Parâmetro da distribuição de ar;
- ΔE – variação de energia (m);
- ΔL – distância ao longo da calha entre as quinas de dois degraus consecutivos (m);
- Δp – subpressão abaixo do escoamento (Pa);
- θ - ângulo do defletor (graus);
- μ – viscosidade dinâmica da água ($\text{N/m}^2 \cdot \text{s}$);
- ν – viscosidade cinemática da água (m^2/s);
- ρ – massa específica da água (kg/m^3);
- σ – índice de cavitação;
- σ_{cr} – índice crítico de cavitação;
- σ_w – tensão superficial do fluido (N/m);
- Φ – inclinação da calha (graus);
- χ – altura da lâmina d'água do núcleo de blackwater (m);
- A_a – área da tubulação de entrada de ar (m^2);
- A_w – área molhada da calha antes do aerador (m^2);
- A_w – área molhada da calha antes do defletor (m^2);
- b – prolongamento do defletor (mm);
- C – concentração pontual de ar ($Q_{ar}/(Q_{ar}+Q_{ag})$);
- C^* - concentração de ar no escoamento (Q_{ar}/Q_{ag});
- C_a – concentração de ar média do escoamento ;
- $C_{a,inf}$ – concentração de ar média na lâmina d'água inferior do escoamento;
- C_b – concentração de ar no fundo da calha;
- C_{bm} – concentração de ar média no fundo da calha;
- C_{bx} – concentração de ar pontual a x cm do pseudo-fundo;
- C_{bu} – concentração de ar no fundo da calha onde a concentração de ar é quase uniforme;

C_p – Coeficiente de pressões extremas;

$C_{px\%}$ – Coeficiente de pressão com probabilidade x de não excedência (%);

D – altura do escoamento desde o pseudo-fundo até a superfície na zona de escoamento com Blackwater (m);

D – diâmetro da tubulação de entrada na câmara de ar (mm);

E – energia específica do escoamento (m);

E_{dc} – energia específica dissipada na calha (m);

E_{dr} – energia específica dissipada no ressalto hidráulico (m);

E_m – energia específica de montante (m);

E_o – número de Euler (m);

E_p – energia específica em qualquer ponto ao longo da calha (m);

E_i – energia específica na saída do ressalto hidráulico (m);

E_r – energia específica residual do escoamento (m);

E_x – Energia específica calculada (m);

F^* - número de Froude rugoso do escoamento;

F_r – número de Froude do escoamento;

F_{ro} – número de Froude de aproximação;

F_{ri} – número de Froude na saída do ressalto hidráulico;

F_{rr} – número de Froude do escoamento no início do ressalto hidráulico;

f – fator de resistência para o escoamento aerado;

f_e – fator de resistência para o escoamento não aerado

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

H_t – altura desde o pé do vertedouro até a lâmina d'água a montante da ogiva (m);

h – profundidade do escoamento (m);

h_{90} – profundidade da água desde o pseudo-fundo até a posição do escoamento com concentração de ar de 90% (m);

h_a – profundidade do escoamento no ponto de início de aeração (m);

h_{aer} – altura da lâmina d'água aerada do escoamento na zona de blackwater (m);

h_c – profundidade crítica do escoamento (m);

h_{calc} – altura da lâmina d'água calculada (m);

h_d – altura do degrau (m);

h_{eq} – altura equivalente de água no escoamento aerado (m);

h_m – altura da lâmina d'água a montante da ogiva (m);

h_{med} – altura da lâmina d'água medida (m);

h_n – profundidade normal no escoamento (m);

h_{naer} – altura da lâmina d'água não aerada do escoamento na zona de blackwater (m);

h_o – profundidade de aproximação (m);

K – macro rugosidade dos degraus definida por $h_d \cos \Phi$;

L – comprimento ao longo da calha a partir do início dos degraus (m);

L^* - comprimento ao longo da calha desde a crista da ogiva até o ponto de estudo (m);

L_a – comprimento ao longo da calha desde o início da ogiva até o ponto de início de aeração (m);

L_a^* - comprimento ao longo da calha desde a crista da ogiva até o ponto de início de aeração (m);

L_{bw} – comprimento ao longo da calha desde o início dos degraus até o final da blackwater (m);

L_i – comprimento desde o início da ogiva até o ponto de estudo (m);

L_j – Comprimento do ressalto hidráulico (m);

$L_{e\ 0,1\%min}^*$ – Posição de ocorrência da pressão extrema mínima (m);

L_{e+n} – Posição a partir da qual os dados de pressões extremas mínimas atingem estabilidade (m);

L_i^* - posição de início dos degraus (m);

L_{jet} – comprimento do jato de água lançado pelo defletor (m);

L_{jete} – distância ao longo da calha desde o final da ogiva até o ponto de impacto do jato no espelho do degrau (m);

L_r – comprimento do ressalto hidráulico (m);

L_{ref} – comprimento de referência (m);

L_{uf} – comprimento ao longo da calha desde o início dos degraus até o início visual do escoamento quase uniforme (m);

L_{vf} – comprimento ao longo da calha desde o início dos degraus até o início do escoamento gradualmente variado (m);

P – pressão (Pa);

$P_{0,1\%}$ - pressão com 0,1% de probabilidade de não excedência (Pa);

$P_{99,9\%}$ - pressão com 99,9% de probabilidade de não excedência (Pa);

$P_{x\%}$ - pressão com probabilidade x de não excedência (Pa);

P_m – pressão média (Pa);

P_v – pressão de vapor do líquido (Pa);

Q_{ag} – vazão de água do escoamento (m^3/s);

Q_{ar} – vazão de ar incorporada ao escoamento (m^3/s);
 q – vazão específica de água ($m^3/s/m$);
 R – número de Reynolds pela vazão unitária;
 R_e – número de Reynolds;
 S – Submergência do ressalto hidráulico;
 s' – posição adimensional ao longo da calha;
 t – altura do defletor (m);
 t_r – altura do degrau do defletor (m);
 W_e – número de Weber;
 W_o – número de Weber no final da ogiva;
 v_c – velocidade do escoamento na posição de altura crítica (m/s);
 v_e – velocidade do escoamento equivalente de água (m/s);
 v_m – velocidade média (m/s);
 v_o – velocidade média de aproximação (m/s);
 v_l – velocidade do escoamento na saída do ressalto hidráulico (m/s);
 v_r – velocidade do escoamento na entrada do ressalto hidráulico (m/s);
 x – parâmetro cujo valo é igual a 0 se $L \leq L_{jet}$ e igual a L_{jet} se $L \geq L_{jet}$. (m)
 x' – distância horizontal a partir da entrada de ar (m).
 Y – altura da calha (m);
 y – altura desde a crista do vertedouro até o ponto de estudo (m);
 y_{calha} – altura da calha do vertedouro (m);
 y_l – altura conjugada lenta do ressalto hidráulico (m);
 y_o – altura da ogiva (m);
 y_r – altura conjugada rápida do escoamento (m);
 Z – Energia específica no ponto analisado (m);
 z_i – carga de montante em relação à posição vertical do início dos degraus (m);
 z_p – cota do piso do degrau (m);

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

F.E. – Fundo de Escala

LOH – Laboratório de Obras Hidráulicas

LAHE – Laboratório de Hidráulica Experimental

AI – Aeração induzida

AN – Aeração Natural

SUMÁRIO

RESUMO	19
ABSTRACT	20
1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS	23
3 ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL	24
3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	24
3.2 DESENVOLVIMENTO DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL	25
3.3 DISSIPACÃO DE ENERGIA	27
3.4 ESTUDOS DE PRESSÕES ATUANTES NOS DEGRAUS	29
3.5 CONCENTRAÇÃO DE AR	35
4 CAVITAÇÃO	38
4.1 CAVITAÇÃO EM VERTEDOUROS DE CALHA LISA	39
4.2 CAVITAÇÃO EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS	40
4.3 AERAÇÃO COMO SOLUÇÃO CONTRA DANOS POR CAVITAÇÃO	45
5 AERAÇÃO INDUZIDA	48
5.1 TIPOS DE AERADORES	48
5.2 AERAÇÃO INDUZIDA EM VERTEDOUROS COM CALHA LISA	50
5.3 AERAÇÃO INDUZIDA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS	50
5.4 DEMANDA RELATIVA DE AR	51
5.5 COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO, CONCENTRAÇÃO DE AR E PRESSÕES NA CALHA. ..	54
5.6 DISSIPACÃO DE ENERGIA	66
6 EFEITOS DE ESCALA	72
7 METODOLOGIA	74
7.1 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA NAS CARACTERÍSTICAS Do ESCOAMENTO AO LONGO DA CALHA EM DEGRAUS	76
7.1.1 ANÁLISE VISUAL DO ESCOAMENTO	77
7.1.2 DESENVOLVIMENTO DAS PRESSÕES AO LONGO DA CALHA EM DEGRAUS	78
7.1.3 ANÁLISE DA ENTRADA DE AR NA CÂMARA DE AR.	78
7.1.4 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE AR JUNTO AOS DEGRAUS	80
7.1.4.1 Relação $Q_{ar} \times h_{aer}$	81
7.1.4.2 Relação $P \times h_{naer}$	83
7.1.4.3 Relação $H_{aer} \times h_{naer}$	84
7.2 verificação da dissipação de energia ao longo da calha em degraus	85
7.2.1 BALANÇO DE ENERGIA E COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO	85

7.2.2	ANÁLISE DE DADOS DE PRESSÃO NA BACIA DE DISSIPACÃO	88
7.3	ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	89
8	RESULTADOS	91
8.1	ANÁLISE DE EFEITO DE ESCALA	91
8.1.1	Efeitos de escala no modelo LOH I.....	92
8.1.2	Efeitos de escala no modelo LOH II.....	93
8.2	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA NAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO 96	
8.2.1	Análise visual das características do escoamento.....	96
8.2.1.1	Identificação das posições características	97
8.2.1.2	Comparação com aeração natural	101
8.2.2	Pressões desenvolvidas ao longo da calha.....	103
8.2.2.1	Verificação da influência da vazão nas pressões desenvolvidas sobre a calha em degraus 104	
8.2.2.2	Verificação da influência da geometria do defletor no desenvolvimento das pressões sobre a calha em degraus	107
8.2.2.2.1	Patamares	107
8.2.2.2.2	Espelhos	109
8.2.3	Análise da entrada de ar na câmara de ar	116
8.2.4	ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE AR AO LONGO DO ESCOAMENTO	118
8.2.4.1	Zona de Blackwater	119
8.2.4.2	Zona totalmente aerada.....	120
8.2.4.3	Totalidade da calha	123
8.2.5	Comparação da concentração de ar no fundo e das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência	125
8.3	ANÁLISE DA DISSIPACÃO DE ENERGIA	129
8.3.1	Comprimento do ressalto hidráulico.....	129
8.3.2	Pressões desenvolvidas na bacia de dissipação	131
8.3.3	Balço de Energia	131
8.3.4	Comparação dos resultados	134
9	CONCLUSÕES.....	136
9.1	Comportamento do escoamento	136
9.2	Pressões junto às quinas dos degraus.....	137
9.3	Demanda relativa de ar	138
9.4	Concentração de ar no fundo do canal	138
9.5	Análise conjunta da concentração de ar no fundo do canal e das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência nos espelhos dos degraus.....	139

9.6	Dissipação de energia.....	140
9.7	Recomendações para trabalhos futuros	140
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	141
	APENDICE A – MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS.....	148
	APENDICE B – ENSAIOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DAS GEOMETRIAS DOS DEFLETORES A SEREM TESTADOS.....	157
	APENDICE C – DETALHES SOBRE A INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES NO MODELO LOH II.....	167
	APENDICE D – ENSAIOS PRELIMINARES PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ENSAIO	169
	APENDICE E – ENSAIOS PRELIMINARES PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO.....	176
	APENDICE F – ENSAIOS PRELIMINARES PARA VERIFICAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO TUBO DE PITOT-PRANDTL E TEMPO DE ENSAIO	184
	APENDICE G – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO UTILIZADA PARA ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE AR NA ZONA DE BLACKWATER.....	188
	APENDICE H – RELAÇÃO ENTRE PRESSÕES MÉDIAS NOS PATAMARES DOS DEGRAUS COM A ALTURA DA LÂMINA D'ÁGUA DO ESCOAMENTO	190
	APENDICE I – RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DA FORMA DE CÁLCULO DA ENERGIA DE MONTANTE	194
	APENDICE J – COMPARAÇÃO DISSIPACÃO DE ENERGIA NOS MODELOS LOH I E LOH II.....	195
	APENDICE L – RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO NAS PRESSÕES NOS PATAMARES E ESPELHOS DOS DEGRAUS.....	196
	APENDICE M – AVALIAÇÃO DA SUBPRESSÃO	198
	APENDICE N – COMPARAÇÃO ENTRE PRESSÕES OBTIDAS COM AERAÇÃO INDUZIDA E NATURAL ...	199
	APENDICE O – COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES COM 0,1% DE PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA COM AERAÇÃO INDUZIDA E NATURAL	209
	APENDICE P – LIMITE INFERIOR DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE WOOD (1984 apud MATOS, 1999)	211
	APENDICE Q – CONCENTRAÇÃO DE AR NO FUNDO NA TOTALIDADE DA CALHA.....	212
	APENDICE R – COMPRIMENTOS DE RESSALTO HIDRÁULICO	213
	APENDICE S – DISSIPACÃO DE ENERGIA PARA O MODELO LOH II.....	219

RESUMO

Os vertedouros em degraus possuem como principais vantagens a dissipação de energia ao longo da calha, que proporciona a utilização de estruturas de dissipação de jusante de menor porte, e também a facilidade e baixo custo de construção através de técnicas como o concreto compactado com rolo (CCR). Apesar disso, essas estruturas tem sua utilização limitada a vazões da ordem de $15 \text{ m}^2/\text{s}/\text{m}$, devido à possibilidade de ocorrência de danos por cavitação, fenômeno relacionado às baixas pressões desenvolvidas nos espelhos dos degraus e das altas velocidades do escoamento. É consenso que a inserção de ar próximo à superfície da estrutura de concreto proporciona proteção contra o efeito de cavitação. Essa solução é amplamente adotada em estruturas de calha lisa e vem sendo objeto de estudos também para calhas escalonadas. Nesse contexto, o presente trabalho objetiva verificar se um aerador do tipo defletor, posicionado no início dos degraus e associado a uma câmara de ar, é capaz de proporcionar a introdução de quantidades suficientes de ar junto ao fundo de forma a ampliar a faixa de vazões possíveis de escoamento em um vertedouro em degraus sem que ocorram danos por cavitação. O estudo, que faz parte do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento intitulado Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Aeração Forçada (Pré-Aeração) em parceria entre Furnas Centrais Elétricas S.A. e Universidade Federal do Rio Grande do Sul foi realizado através de modelagem física, utilizando três modelos de vertedouros em degraus com diferentes características. Dois modelos encontram-se no Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS) e um no Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE/Furnas). Nos ensaios foram coletados dados de pressões ao longo da calha, junto às quinas dos degraus e na bacia de dissipação junto ao pé do vertedouro, bem como dados referentes às alturas de escoamento e medições de velocidade de entrada de ar utilizando como sistema aerador defletores de diferentes comprimentos em conjunto com uma câmara de ar. Os dados obtidos foram comparados a dados provenientes de ensaios com aeração natural e também foi estimada teoricamente a concentração de ar junto ao fundo da calha. De forma geral as pressões analisadas, com diferentes probabilidades de não excedência, com exceção da região de impacto do jato, não apresentaram diferenças significativas em relação às mesmas pressões com aeração natural. Porém foi observada concentração de ar ao longo de todo o contato do escoamento com a calha. A concentração de ar foi maior utilizando o defletor de maior comprimento, sendo superior a 3% em todos os pontos da calha para as vazões até $0,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (referente a cerca de $23 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em protótipo) o que representa uma vantagem significativa em relação à aeração natural, que tem início de inserção de ar no escoamento apenas a jusante do ponto de início de aeração. Também foi realizada uma análise de dissipação de energia que indicou que não houve alteração na dissipação de energia com a indução de ar no escoamento devido às concentrações não serem suficientes para reduzir significativamente o coeficiente de atrito.

Palavras-chave: Vertedouros em degraus. Aeração induzida. Pressões.

ABSTRACT

Stepped spillways have the main advantages of energy dissipation along the chute, which provides the use of smaller downstream dissipation structures, and, also the low cost and easy of construction through techniques such as roller compacted concrete (RCC). Despite the advantages, these structures have their utilization limited to discharges to the order of 15 m²/s, due to the risk of damage by cavitation, a phenomenon related to the low pressures developed in vertical faces of steps and high flow velocities. There is a general agreement that the air insertion into the flow near the surface of the concrete structure provides protection against cavitation effect. This solution is already widely adopted in smooth chutes structures and has been the subject of studies also for stepped chutes. In this context, the present study aims to verify if an aerator type deflector, positioned at the beginning of the steps and associated with an air chamber is able to provide the introduction of sufficient amounts of air near the bottom of the channel in order to increase the discharges capable of flowing over stepped spillway without cavitation damage. This study, which is part of the research project named Analysis of Macroturbulence in Stepped Spillways with Forced Aeration (Pre – Aeration) in partnership between Furnas Centrais Elétricas S.A. e Universidade Federal do Rio Grande do Sul, was carried out through physical modeling, using three stepped spillway models with different physical characteristics. Two of the models are localized in Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/UFRGS) and one in Laboratório de Hidráulica experimental (LAHE/Furnas). During the tests were collected pressures data along the chute and in the dissipation basin, near the chute, as well as data related to flow depths and measurements of velocity of air entrance in the flow utilizing, as aerator system different length deflectors associated with an air chamber. The obtained data were compared to data from natural aeration tests and also was made a theoretical estimation of air concentration near the bottom of the chute. In general, the pressures analyzed, with different non-exceedance probabilities, except the jet impact region, have not presented significant changes in relation to the same pressures with natural aeration. However, some air concentration was observed throughout the entire contact between flow and structure. The air concentration was higher using the biggest extension deflector, being superior than 3% throughout the chute extension for discharges up to 0,4 m³/s/m (approximately 23 m³/s/m in prototype) which represents a significant advantage in relation to natural aeration, which air insertion beginning just downstream from the inception point. An analysis of energy dissipation was also performed and has indicated that there is no alteration in energy dissipation with the air induction in the flow due to the air concentrations not being enough to reduce, significantly the friction factor.

Keywords: Stepped spillway. Induced aeration. Pressures.

1 INTRODUÇÃO

Durante uma cheia, a água excedente em um reservatório de uma obra hidráulica deve ser reconduzida ao rio de forma segura e em condições que não causem danos ao seu leito. Os vertedouros em degraus, além de contribuírem para segurança da obra, permitem que a maior parte da energia seja dissipada durante a passagem do escoamento pela calha. Dessa forma, as estruturas de dissipação localizadas a jusante podem possuir dimensões menores, reduzindo o custo da obra.

Apesar das vantagens associadas às estruturas escalonadas, os vertedouros em degraus estão limitados a vazões específicas da ordem de 15 a 20 m³/s/m devido à ocorrência de erosão/cavitação em escoamentos com maiores vazões. A macrorrugosidade imposta pelos degraus favorece a ocorrência de zonas de baixa pressão onde podem se formar bolhas de vapor que, ao serem deslocadas com o escoamento, podem atingir zonas de pressões mais altas, ocasionando seu colapso. Caso esse colapso ocorra próximo à superfície da estrutura, podem ocorrer danos de erosão por cavitação. Devido à demanda cada vez maior de vertedouros com possibilidade de extravasamento de altas vazões e às conhecidas vantagens atribuídas aos vertedouros em degraus, algumas pesquisas vêm sendo desenvolvidas a fim de ampliar a faixa de vazões possíveis de escoamento nessas estruturas, reduzindo-se o risco de ocorrência de cavitação.

A introdução de ar para o interior do escoamento é uma medida já consolidada para vertedouros de calha lisa visando à proteção do concreto em zonas propensas à cavitação. Nesses casos, os elementos mais utilizados são defletores, degraus e ranhuras acompanhados de elementos que proporcionam o fornecimento de ar como pilares e dutos de ventilação. Acredita-se que é possível também ampliar a faixa de vazões escoadas em vertedouros em degraus através da inserção de ar junto ao fundo da calha de modo a proteger os degraus do efeito da cavitação. Alguns estudos já foram conduzidos no âmbito da aplicação de elementos aeradores também em vertedouros em degraus. Existem alguns estudos acerca da instalação de pilares e defletores nessas estruturas, geralmente no que diz respeito à concentração de ar e comportamento do escoamento

A presente pesquisa se concentra no estudo das pressões desenvolvidas ao longo dos degraus da calha, e na concentração de ar no escoamento em um modelo físico de vertedouro em degraus com aeração induzida por defletor e fornecimento de

ar por um elemento do tipo câmara de ar. Além disso, também pretende-se verificar a influência da aeração induzida na dissipação de energia ao longo da calha em degraus.

Para que a análise seja desenvolvida, a presente pesquisa conta com três diferentes modelos de vertedouros em degraus, dois deles presentes no Laboratório de Obras Hidráulicas - LOH – IPH – UFRGS (modelos LOH I e LOH II), e um existente no Laboratório de Hidráulica Experimental - LAHE – FURNAS (modelo LAHE). Em cada um deles os ensaios foram conduzidos com as vazões adequadas, sendo 5 vazões no modelo LOH I (correspondendo a vazões específicas em protótipo de 3,2 a 11,1 m³/s/m e degraus de 0,60 m de altura considerando a escala de 1:10), 8 vazões no modelo LOH II (correspondendo a vazões específicas em protótipo de 3,2 a 29 m³/s/m e degraus de 0,60 m de altura considerando a escala (1:10) e 7 vazões no modelo LAHE (correspondendo a vazões específicas em protótipo de 3,2 a 11,2 m³/s/m e degraus de 0,90 m de altura considerando a escala de 1:10).

2 OBJETIVOS

Considerando-se a hipótese de que é possível, através da inserção de ar no escoamento, a ampliação da faixa de vazões escoadas por um vertedouro em degraus reduzindo-se os danos por erosão/cavitação, o presente trabalho visa à verificação do efeito da inclusão de um defletor na calha associado a uma câmara de ar no perfil dessas estruturas. A ampliação da faixa de vazões possível de escoamento em um vertedouro em degraus sem que ocorram danos de cavitação é vantajosa pois é possível reduzir a largura da calha do vertedouro proporcionando maior economia à obra. Dessa forma, o objetivo principal da presente pesquisa é verificar se um aerador do tipo defletor, posicionado no início dos degraus e associado a uma câmara de ar, é capaz de proporcionar a introdução de quantidades suficientes de ar junto ao fundo de forma a ampliar a faixa de vazões possíveis de escoamento em um vertedouro em degraus sem que ocorram danos por erosão/cavitação.

Os objetivos secundários, que serão atingidos para que o objetivo principal seja alcançado, estão relacionados a seguir:

- verificação do comportamento do escoamento e análise das pressões atuantes ao longo da calha em degraus com defletor e câmara de ar (escoamento com indução de ar);
- comparação entre dados de pressão e comportamento do escoamento com aeração induzida e com aeração natural;
- verificação da vazão de ar inserida ao escoamento através do aerador em relação à vazão específica de água escoadas no vertedouro;
- estimativa teórica da concentração de ar ao longo da calha em degraus;
- verificação do efeito da indução de ar na dissipação de energia ao longo da calha em degraus.

Para atingir os objetivos da presente pesquisa, foi realizada a aquisição de dados em três diferentes modelos físicos de vertedouro em degraus com aeração induzida através de defletor e câmara de ar.

É importante salientar que o presente trabalho se limita a estudar escoamentos com números de Froude entre 2,83 e 6,14 e números de Weber ($W (h_0)$) entre 45 e 153. Os números de Froude e Weber foram calculados no início do defletor.

3 ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Os vertedouros em degraus são utilizados em diversas obras hidráulicas no Brasil e no mundo devido à vantagem de a dissipação de energia ocorrer, na maior parte, durante a passagem do escoamento pela calha em degraus. Esse fenômeno gera uma redução nas dimensões das estruturas de dissipação a jusante e, conseqüentemente, reduz os custos na construção da obra. Há registros da utilização dessas estruturas desde a antiguidade, porém, estima-se que em 1892 foi construído o primeiro vertedouro em degraus com o objetivo de dissipação de energia (Barragem de New Croton, EUA). A partir da década de 70, com o desenvolvimento da tecnologia do concreto compactado a rolo (RCC), os vertedouros em degraus começaram a ser amplamente utilizados devido à facilidade e economia na construção de estruturas escalonadas. Maiores detalhes sobre o histórico dos vertedouros em degraus podem ser obtidos em Tozzi (1992), Sanagiotto (2003), Simões (2012) entre outros. A Tabela 1 apresenta uma relação de algumas barragens com vertedouros em degraus existentes no Brasil.

Tabela 1 – Barragens com vertedouros em degraus existentes no Brasil

Nome da barragem	Estado	Data do fim da construção
Barragem do Rio da Dona	Bahia	1998
Barragem Malhada de Pedras	Bahia	1997
Barragem de Pindobaçu	Bahia	2005
UHE Garibaldi	Santa Catarina	2013
São Roque	Santa Catarina	Obra paralisada
UHE Monte Claro	Rio Grande do Sul	2004
UHE 14 de Julho	Rio Grande do Sul	2008
Barragem Val de Serra	Rio Grande do Sul	1999
UHE Dona Francisca	Rio Grande do Sul	2000
Barragem João Leite	Goiás	2004
Barragem do Rio São Bento	Santa Catarina	2003
Barragem Cristalândia	Bahia	2010
Barragem de Santa Cruz do Apodi	Rio Grande do Norte	2001
UHE Rosal	Espírito Santo / Rio de Janeiro	2000
UHE Santa Clara	Paraná	2005

Nome da barragem	Estado	Data de fim da construção
UHE Fundão	Jordão e Pinhão (PR)	2006
Barragem Acauã	Salgado de São Félix (PB)	1995
Barragem Botuverá	Santa Catarina	Em projeto
UHE Castro Alves	Nova Roma do Sul (RS)	2008
Barragem Caraíbas	Caraíbas – Minas Gerais	1991
Barragem Jucazinho	Surubom - Pe	1999
Barragem Governador Eduardo Campos	Pernambuco	2017
Barragem Arthur Tavares de Melo	Pernambuco	2003
Belo jardim	Pernambuco	1995-1998
Barragem Ipojuca	Pernambuco	Sem informação
Barragem Timbaúba	Pernambuco	Sem informação
PCH João Borges	Santa Catarina	2013
Barragem Bertarello	Rio Grande do Sul	1998 - 2000
Barragem do Rio São Bento	Santa Catarina	2003
Barragem Canoas	Ceará	1993-1996
Barragem Carnaúba	Ceará	2002
Barragem Cova da Mandioca	Bahia	1993 – 1994
Barragem Duas Serras	Pernambuco	2008
Estreito	Piauí	2002
Gameleira	Minas Gerais	1991
Guilman-Amorin	Minas Gerais	2000
Juba I	Mato Grosso	1995
Juba II	Mato Grosso	1996
Pedras Altas	Bahia	2001
Rio do Peixe	São Paulo	1998
Rio da Prata	Pernambuco	1993 – 1994
Traíras	Rio Grande do Norte	1998-2000
Umari	Rio Grande do Norte	2001

3.2 DESENVOLVIMENTO DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL

O escoamento sobre vertedouros em degraus pode ocorrer de três formas distintas: escoamento por quedas sucessivas (*nappe flow*), escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*) e escoamento de transição. Maiores informações sobre as características de cada tipo de escoamento podem ser obtidas em Chanson (1994a), Chanson (1994b) Matos (1999), Ohtsu et al. (2004), Dai Prá (2004), Simões (2012) e Conterato (2014). A presente pesquisa foca no escoamento deslizante sobre turbilhões por ser o mais aplicável em grandes obras hidráulicas.

O escoamento deslizante sobre turbilhões ocorre em superfícies escalonadas com fortes inclinações e altas vazões e caracteriza-se pela formação de turbilhões (vórtices estáveis) entre os degraus, que servem de rolamento para o escoamento principal, não sendo observadas cavidades de ar nos degraus. Segundo Chanson (2001), os vórtices se mantêm devido à transmissão de energia do escoamento principal que ocorre na passagem do escoamento pelas quinas dos degraus. Esse escoamento é aplicado em obras hidráulicas de grande porte como vertedouros em degraus de barragens devido às altas vazões necessárias. Nas Figura 1 e Figura 2 o escoamento deslizante sobre turbilhões é apresentado esquematicamente e por fotografia.

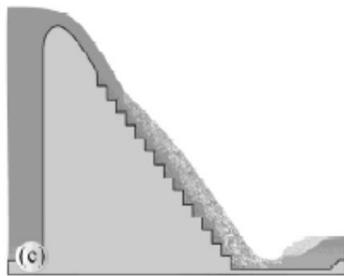


Figura 1 – Esquema de um escoamento sobre turbilhões (fonte: Simões, 2012)



Figura 2 – Foto de um escoamento deslizante sobre turbilhões (fonte: www.sulinfoco.com.br/nivel-da-barragem-do-rio-sao-bento-comeca-a-normalizar)

O desenvolvimento do escoamento deslizante sobre turbilhões com aeração natural, ou seja, com calha em degraus sem adição de nenhum elemento aerador, pode ser dividido em três zonas (Figura 3).

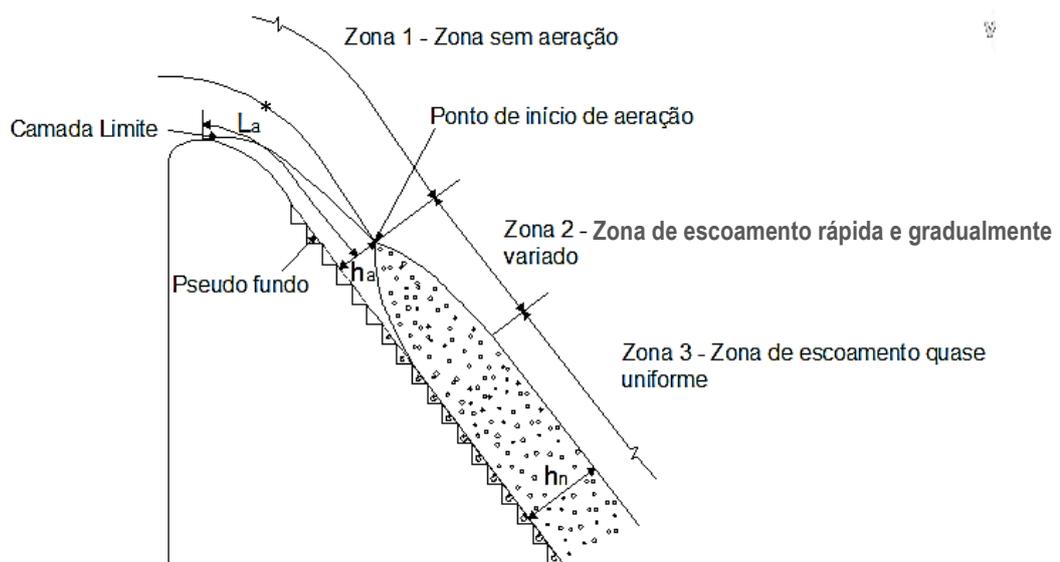


Figura 3 – Desenvolvimento do escoamento deslizante sobre turbilhões sobre um vertedouro em degraus. (Adaptado de CHANSON, 1994b)

A zona 1 (sem aeração) representa a região onde o escoamento é não aerado, ou seja, anteriormente ao desenvolvimento pleno da camada limite. O ponto onde a camada limite encontra a superfície do escoamento é denominado ponto de início de aeração, a partir de então, o ar começa a ser incorporado ao escoamento. A zona subsequente, que possui ar incorporado, porém não na totalidade da lâmina d'água, é chamada zona 2 (escoamento rápida e gradualmente variado). Nessa zona a altura da lâmina d'água varia consideravelmente desde o ponto de início de aeração até o início da zona 3 (escoamento quase uniforme), que é caracterizada pela plena aeração da lâmina de água sobre o vertedouro e pela pequena variação na sua espessura, razão pela qual o escoamento é chamado de quase uniforme.

A determinação do local e da espessura da lâmina d'água no ponto de início de aeração já foi estudada por diversos autores. Quanto maior é a vazão, mais a jusante ocorre o ponto de início de aeração.

3.3 DISSIPACÃO DE ENERGIA

A principal vantagem dos vertedouros em degraus é a energia dissipada durante a passagem do escoamento pela calha. Segundo Conterato (2014), a geometria dos degraus, a declividade da calha, o tipo de escoamento desenvolvido e a aeração do escoamento influenciam na dissipação de energia.

Tozzi (1992) estimou a dissipação da energia em calhas em degraus com declividades 1V:0,75H e 1V:6,69H através da determinação teórica da energia residual pelo método das diferenças finitas; da avaliação do ressalto hidráulico, medindo a altura conjugada lenta e calculando a altura conjugada rápida e a energia residual a partir da Equação 1 e da Equação 2 e da medição das velocidades no final da calha. A relação entre energia residual da calha com e sem degraus resultou em 40 a 66%.

$$\frac{y_l}{y_r} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_{rr}^2} - 1) \quad \text{Equação 1}$$

$$E_r = y_r + \frac{q^2}{2gy_r^2} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: y_r e y_l = alturas conjugadas rápida e lenta, respectivamente (m); F_{rr} = número de Froude do escoamento na posição de y_r ; E_r = energia residual do escoamento (m); q = vazão específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$); g = aceleração da gravidade (m/s^2).

Sanagiotto (2003) avaliou a dissipação de energia em uma calha com declividade 1V:0,75H, degraus com alturas de 3, 6 e 9 cm e vazões específicas de

0,027 a 0,70 m³/s/m em modelo (0,85 a 22 m³/s/m em protótipo) através da Equação 3 e da Equação 4. A dissipação resultante foi de 21 a 92% da energia de montante, dependendo das características da calha e do escoamento, sendo os valores mais significativos obtidos para maiores degraus e menores vazões.

$$E_p = z_p + h_n \cos \alpha + \alpha \frac{v_m^2}{2 \cdot g} \quad \text{Equação 3}$$

$$\frac{\Delta E}{E_m} = \frac{E_m - E_p}{E_m} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: ΔE = variação de energia; α = coeficiente de Coriolis; E_p = energia em qualquer ponto ao longo da calha (m); Z_p = cota do piso do degrau (m); h_n = profundidade normal do escoamento (m); v_m = velocidade média correspondente, calculada a partir de h_n (m/s); E_m = energia de montante (m); g = aceleração da gravidade (m/s²).

Dai Prá (2004) realizou análise semelhante para uma calha com inclinação 1V:1H e obteve valores de dissipação entre 27 e 90% da energia de montante. Sanagiotto (2003) apresentou a Figura 4, que relaciona os valores de dissipação de energia com a energia de montante para seus dados (pontos coloridos) comparados com os de outros autores. A autora obteve resultados próximos aos de Stephenson (1991), Bindo et al. (1993 apud Sanagiotto, 2003)¹ e Christodoulou (1993 apud Sanagiotto, 2003)², superiores aos de Povh (2000 apud Sanagiotto, 2003)³ e inferiores aos de Soresen (1985 apud Sanagiotto 2003)⁴. Na Figura 4, ΔE é a variação de energia, E_m é a energia de montante, Y é a altura da calha e h_c é a profundidade crítica do escoamento.

¹ BINDO, M., GAUTIER, J., LACROIX, F. The stepped spillway of M'Bali Dam. **Water Power & Dam Construction**, p. 35-36, janeiro, 1993.

² CHRISTODOULOU, G. C. Energy dissipation on stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v.118, n. 1, p. 111-113, Janeiro, 1993.

³ POVH, P. H. Avaliação da energia residual a jusante de vertedouros em degraus com fluxo em regime skimming flow. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal do Paraná. Curitiba: UFPR, 141 f., 2000.

⁴ SORESEN, R., M. Stepped spillways hydraulic model investigation. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 127, 524 f., 2001.

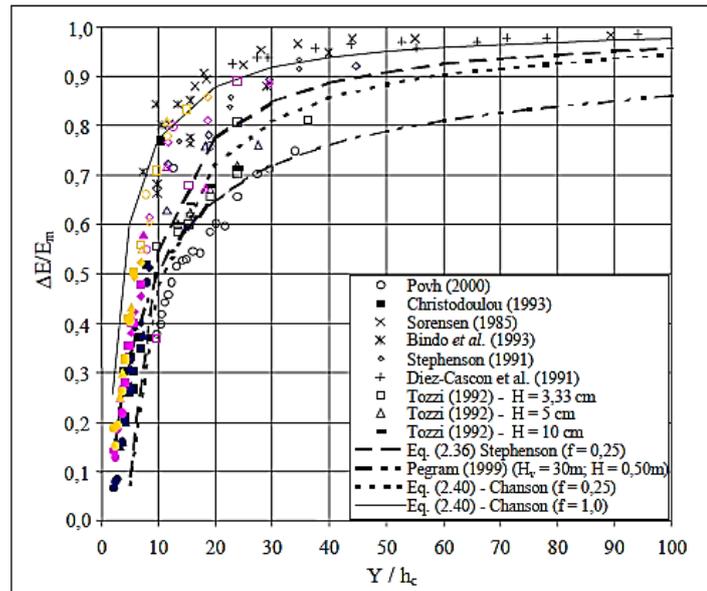


Figura 4 – Resultados experimentais de dissipação de energia com relação à altura da calha obtidos por Sanagiotto (2003) comparados com os de diferentes autores. (fonte: SANAGIOTTO, 2003)

3.4 ESTUDOS DE PRESSÕES ATUANTES NOS DEGRAUS

As pressões desenvolvidas em uma calha em degraus estão ligadas à ocorrência de danos ocasionados devido ao fenômeno da cavitação, já que este se desenvolve em zonas de baixa pressão. Para comprovar que o escoamento é bidimensional e pode ser avaliado apenas no eixo central de um modelo físico, Sánchez-Juny (2001) realizou ensaios de bidimensionalidade em um modelo com degraus de 0,1 m de espelho e 0,08 m de patamar com vazões de até 0,333 m³/s/m. Foram obtidas pressões instantâneas em 4 posições simétricas ao eixo central da calha (Figura 5). Após a tranquilização adequada do escoamento, as pressões nos quatro pontos resultaram semelhantes, comprovando a bidimensionalidade.

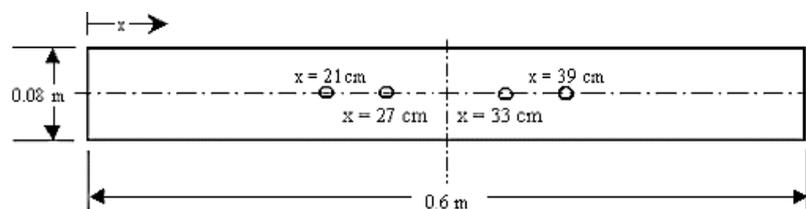


Figura 5 – Posição das tomadas de pressão para ensaio de bidimensionalidade. (fonte: SÁNCHEZ-JUNY, 2001)

A fim de verificar o comportamento das pressões nos espelhos e patamares dos degraus, Sanchez-Juny (2001), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Povh (2004), Sanchez-Juny (2007), Sanchez-Juny (2008), Zhang et al (2012) e Zhang et al. (2016) mediram as pressões em diferentes posições nos espelhos e patamares dos degraus. Dentre as conclusões dos autores está o fato de que as pressões são majoritariamente

positivas nos patamares e negativas nos espelhos dos degraus, com pressões mais extremas próximo à quina dos degraus. Segundo Gomes (2006), podem ser responsáveis pelas pressões extremas nas quinas dos degraus, a separação da camada limite nas extremidades externas dos espelhos, o impacto do escoamento sobre os patamares e processos de acoplamento, crescimento, transmissão de energia e dissipação dos macrovórtices.

Conhecendo-se o desenvolvimento das pressões na extensão dos espelhos e patamares dos degraus, alguns trabalhos foram desenvolvidos visando a avaliação do desenvolvimento das pressões ao longo da calha. Na sua maioria, as pressões foram medidas no eixo central da calha e próximo à quina dos degraus pelos motivos apresentados anteriormente.

A Figura 6 apresenta os resultados de Sanchez-Juny (2001) quanto às pressões médias, desvio padrão e percentis de 50, 95 e 5% adimensionalizados pela altura dos degraus em função da posição na calha adimensionalizada pela rugosidade dos degraus, considerando a maior vazão ensaiada para os patamares e espelhos dos degraus, respectivamente. Nos gráficos, P é a estatística referente às pressões medidas, descritas na legenda, γ é o peso específico da água, h_d é a altura do degrau e h_c é a profundidade crítica do escoamento.

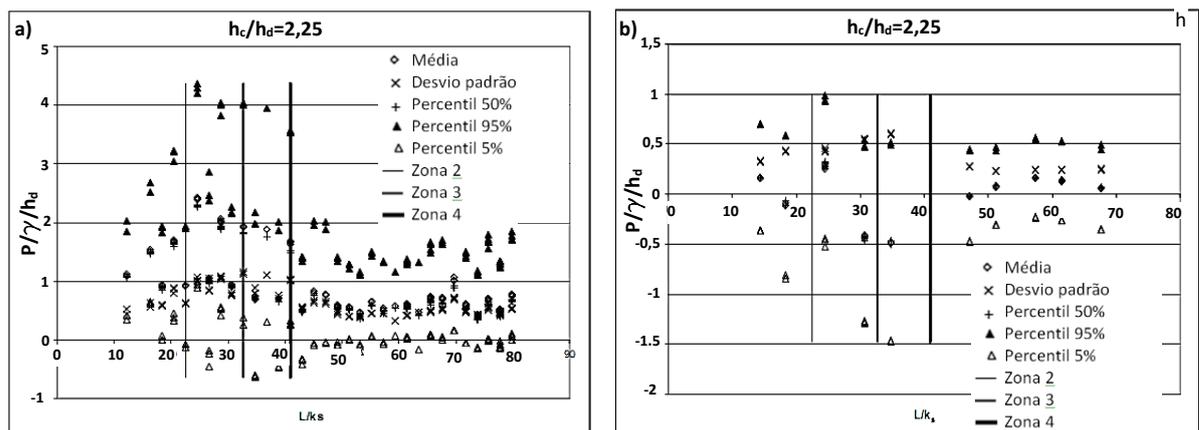


Figura 6 – Parâmetros estatísticos das pressões desenvolvidas ao longo da calha em degraus (a) nos patamares e (b) nos espelhos dos degraus. (fonte: adaptado de SÁNCHEZ-JUNY, 2001)

Na Figura 6, as linhas representam os limites das zonas de início de aeração determinadas como mostra a Figura 7. O autor concluiu que, para os patamares, a montante da zona 3, os valores de pressão tendem a aumentar. A partir dessa seção, à medida que a concentração de ar aumenta, as pressões tendem a diminuir até um valor de equilíbrio. As pressões nos espelhos possuem o mesmo comportamento

ondulante estacionário dos patamares, porém com pressões menores, devido à tendência de separação do fluxo do espelho do degrau.

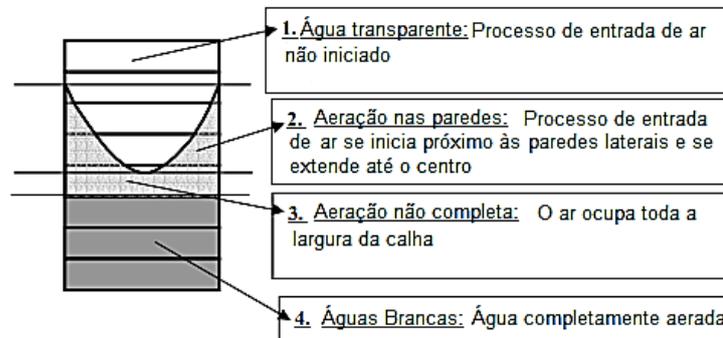


Figura 7 – Zonas de início de aeração do escoamento sobre vertedouros em degraus.

As pressões médias apresentadas pelo autor indicam a tendência geral dos valores alcançados (majoritariamente negativos ou positivos por exemplo). O desvio padrão tem sua importância ligada à variação das pressões em relação à média. Os diferentes percentis apresentados por Sanchez-Juny (2001), por sua vez, tem por objetivo expor pressões com menores probabilidades de não excedência ao longo da calha, mas que podem estar associadas à possíveis problemas. As pressões extremas máximas estão relacionadas às maiores pressões que podem ocorrer na calha e podem ser úteis para dimensionamento, especificação do material a ser utilizado, etc. e as pressões extremas mínimas podem estar ligadas à ocorrência do fenômeno da cavitação e possíveis danos provocados por ele. Não existe ainda, na bibliografia, um consenso de qual percentil deve ser avaliado como base para possíveis danos por cavitação, porém, Lopardo (1996) sugere que as pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% não devem alcançar valores iguais ou inferiores à pressão de vapor da água.

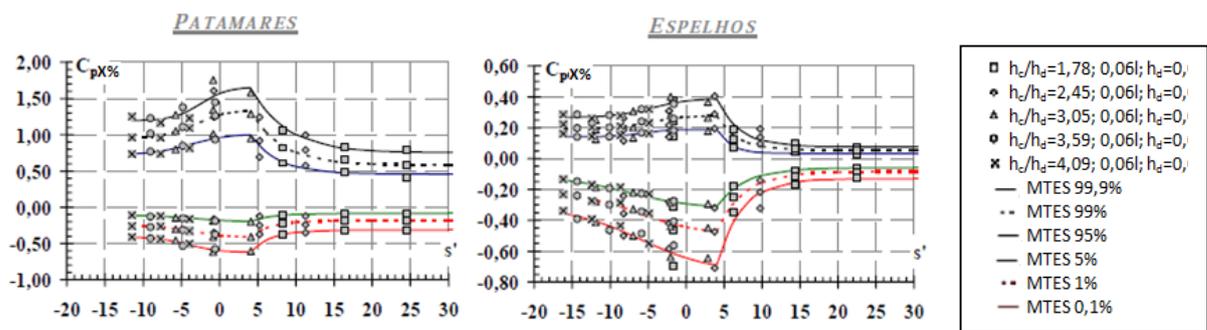
Gomes (2006) apresentou as pressões extremas ao longo da calha a partir de ensaios em modelos físicos e desenvolveu modelos teóricos experimentais (MTES) para sua previsão. A Figura 8 apresenta os seus resultados experimentais e modelos teórico-experimentais para os coeficientes de pressões extremas (C_p) nos patamares e espelhos dos degraus, respectivamente. Nas figuras o valor de $C_{px\%}$ e de s' se referem à Equação 5 e à Equação 6, h_d se refere à altura do degrau e h_c à profundidade crítica do escoamento. Percebe-se que as pressões extremas de 99,9, 99 e 95% de probabilidade de não excedência crescem até $s'=5$ e, na sequência decrescem tendendo a um valor constante. Os valores mais altos são observados para a probabilidade de 99,9%. As pressões com probabilidade de não excedência de

0,1, 1,0 e 5,0% apresentam comportamento semelhante, porém espelhado em relação ao eixo x. Os menores valores são observados para a probabilidade de 0,1%. Tanto os dados referentes aos patamares quanto aos espelhos apresentam o mesmo comportamento, porém os dos patamares apresentam maior magnitude.

$$C_{px\%} = \frac{P_{x\%}}{\frac{v_m^2}{2g}} \quad \text{Equação 5}$$

$$s' = \frac{(L^* - L_a^*)}{h_a} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: $C_{px\%}$ =coeficiente de pressão com probabilidade x de não excedência; $P_{x\%}$ =pressão com probabilidade x de não excedência (m.c.a.); v_m =velocidade média do escoamento (m/s); g =aceleração da gravidade (m/s²); s' =posição adimensional ao longo da calha; L^* =comprimento da pseudo-soleira do vertedouro considerando como origem a crista da ogiva; L_a^* =comprimento da pseudo-soleira da crista da ogiva até a seção de afloramento da camada limite; h_a =profundidade equivalente de água na seção de afloramento da camada limite.



$C_{px\%}$ - coeficiente de pressão extremo; $x\%$ = probabilidade de ocorrência de valores inferiores.

Obs.: consulte a legenda para determinar os valores de $x\%$ e, conseqüentemente, $C_{px\%}$.

Figura 8 - Resultados experimentais e modelos teórico-experimentais de Gomes (2006) para os coeficientes de pressões extremas desenvolvidas nos patamares. (fonte: adaptado de GOMES, 2006)

Osmar (2016), através dos dados de Sanagiotto (2003) e Conterato (2011), também analisou o desenvolvimento das pressões extremas ao longo de uma calha em degraus e comparou os dados com os de diferentes autores. O modelo estudado por Conterato (2011), assim como o de Sanagiotto (2003), possui inclinação de 1V:0,75H, porém a autora realizou ensaios apenas com degraus de 6 cm de altura. A Figura 9 apresenta o coeficiente de pressões extremas (C_p) (Equação 5) em função da posição na calha (s') (Equação 6) obtido para os dados do autor em comparação com os modelos teórico experimentais de Amador (2005) e Gomes (2006) para os espelhos dos degraus. O autor observou que os valores máximos de C_p 99,9% ocorreram no trecho inicial da calha e foram atenuados ao longo do escoamento e que as pressões mínimas (C_p 0,1%) foram intensificadas no trecho não aerado do escoamento. Seus dados apresentaram uma convergência com os resultados de

Amador (2005) e foram, na maioria, mais extremos que os de Gomes (2006). A Figura 10 apresenta os mesmos parâmetros da Figura 9, porém para os patamares dos degraus. O autor concluiu que, nos patamares, tanto os valores máximos de C_p 99,9% como os valores mínimos de C_p 0,1% ocorreram ao final da calha. Na comparação com os modelos teórico-experimentais de Gomes (2006), os dados de Osmar (2016) convergem em C_p 0,1% e são mais extremos para C_p 99,9%. Observando-se as figuras, percebe-se também que os valores mais extremos de C_p 99,9% são observados nos patamares e que os valores mais extremos de C_p 0,1% ocorrem para os espelhos.

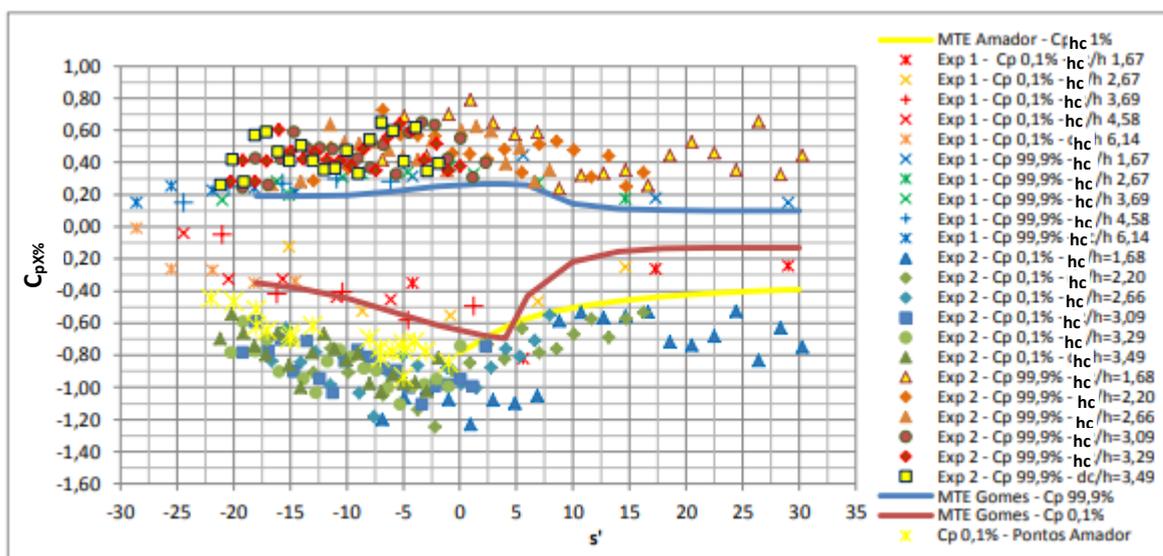


Figura 9 – Coeficiente de pressões extremas (P 0,1% e P 99,9%) nos espelhos dos degraus (fonte: OSMAR, 2016).

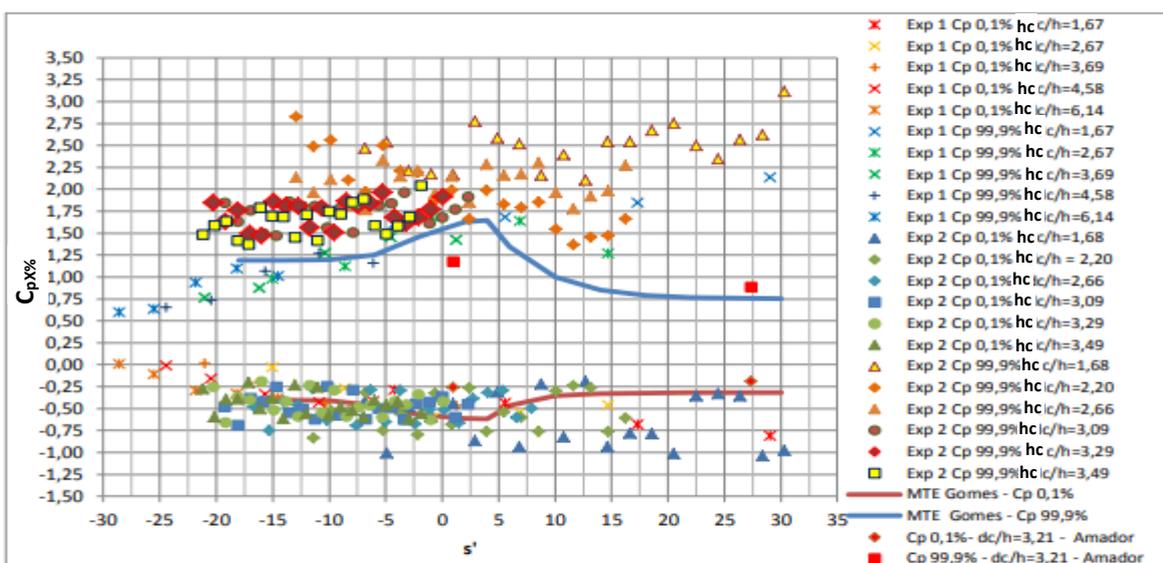


Figura 10 - Coeficiente de pressões extremas (P 0,1% e P 99,9%) nos patamares dos degraus (fonte: OSMAR, 2016).

Canellas (2020) verificou uma tendência de comportamento das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência e apresentou uma metodologia para sua previsão com base em três pontos principais. A Figura 11 apresenta esse comportamento no qual os principais pontos são: posição de início dos degraus (L_i^*), posição de ocorrência da pressão extrema mínima ($L_{e0,1\%min}^*$) e posição a partir da qual os dados de pressão passam a oscilar em torno de um mesmo valor (posição de estabilidade). Segundo a autora, a tendência de comportamento das pressões extremas mínimas pode ser estimada interligando-se esses pontos por retas, formando uma aparência triangular.

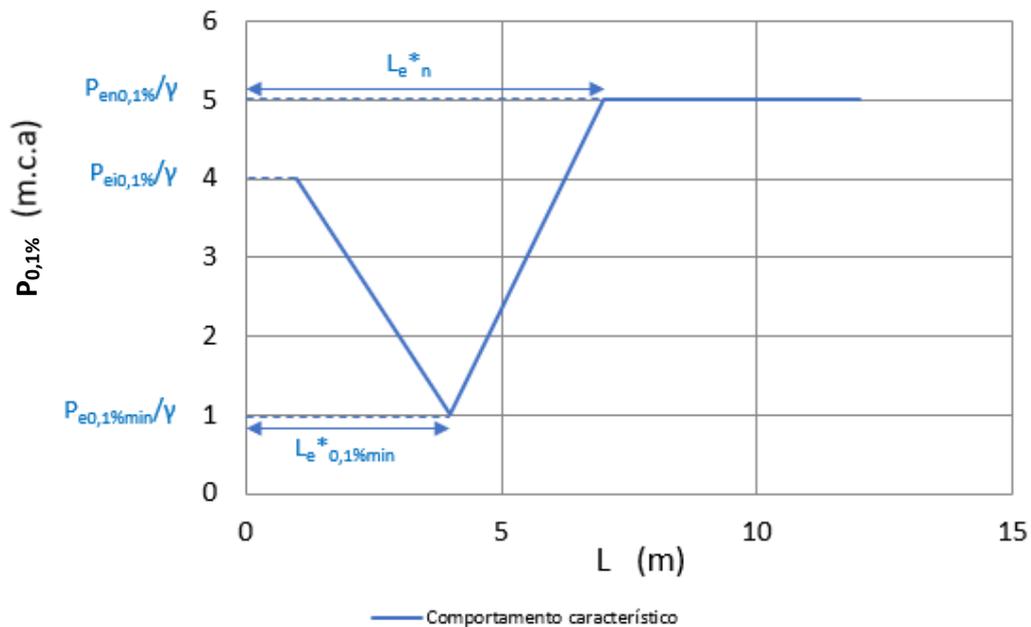


Figura 11 – Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência (fonte: CANELLAS, 2020)

3.5 CONCENTRAÇÃO DE AR

A concentração de ar média no escoamento (Equação 7) pode ser descrita como a integral da concentração de ar local (C) ao longo da profundidade do escoamento. A definição da profundidade do escoamento na região aerada em um vertedouro em degraus pode ser definida como a distância desde o pseudo-fundo até a posição do escoamento que possui concentração de ar de 90% (h_{90}). Através da concentração média de ar, é possível calcular a altura equivalente de água do escoamento aerado. Com relação às vazões de água de ar do escoamento, a concentração de ar também pode ser descrita de acordo com a Equação 9.

$$C_a = \frac{1}{h_{90}} \int_0^{h_{90}} C \cdot dh \quad \text{Equação 7}$$

$$h_{eq} = (1 - C_a)h_{90} \quad \text{Equação 8}$$

$$C_a = \frac{Q_{ar}}{Q_{ar} + Q_{ag}} \quad \text{Equação 9}$$

Onde: C_a =concentração média de ar; h_{90} =altura do escoamento desde o pseudo-fundo até o ponto de concentração de ar de 90%; C=concentração pontual de ar; h_{eq} =altura equivalente de água em um escoamento aerado; Q_{ar} = vazão de ar; Q_{ag} =vazão de água.

Em um escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração natural a inserção de ar se dá, unicamente, através da superfície livre do escoamento. Até o ponto de início de aeração, local onde a camada limite ainda se encontra em desenvolvimento, o ar não é introduzido em quantidade significativa para o interior do escoamento. Apesar de a concentração média de ar possuir valores próximos a 14% nas seções iniciais da calha e que aumenta ao longo da calha até cerca de 20% na seção de afloramento da camada limite, segundo Meireles et al. (2012), junto ao fundo do escoamento, essa concentração é insignificante. A partir do ponto de início de aeração, onde a camada limite atinge a superfície do escoamento, o ar começa a ser introduzido no escoamento em grandes quantidades. Estima-se que, nas regiões de escoamento quase uniforme, a concentração de ar média alcança valores em torno de 60%, segundo estudos como Matos (1999), Boes (2000 apud TERRIER, 2016) e Matos (2005). A Tabela 2 apresenta equações desenvolvidas por diferentes autores para estimativa da concentração média e pontual de ar ao longo da calha em degraus de acordo com a região do escoamento de interesse.

Tabela 2 – Equações para concentração de ar em escoamento com aeração natural.

Região do escoamento	Autor	Equação	
Região não aerada	Meireles et al. (2012)	$C_a = 0,14 + 0,063 \left(\frac{L_i}{L_a}\right)^{10,8}$	Equação 10
Ponto de início de aeração	Matos (1999)	$C_a = 0,163(F^{*0,154})$	Equação 11
	Boes e Hager (2003)	$C_a = 0,0012(240 - \alpha)$	Equação 12
		$C_a = 0,21 + 0,297(2,72^{-0,497(\ln s' - 2,972)^2})$	Equação 13
Escoamento rápida e gradualmente variado	Matos (1999)	$C_{b0,032} = \frac{0,381}{1 + \left(\frac{s'}{14,189}\right)^{1,232}}$	Equação 14
		$C_{b0,82} = \frac{0,47}{1 + \left(\frac{s'}{14,787}\right)^{1,162}}$	Equação 15
		$C_{b1,32} = \frac{0,517}{1 + \left(\frac{s'}{14,787}\right)^{1,126}}$	Equação 16
Escoamento quase uniforme	Matos (1999)	$C_a = 0,76(\sin \alpha^{0,82})$	Equação 17
	Boes (2000 apud Terrier, 2016)	$C_a = 0,6 - 0,00611F_s$	Equação 18
	Matos (2005)	$C_a = 1 - 0,46(F_s^{0,15-0,1 \tan \alpha})$	Equação 19

Onde: C_a = concentração média de ar; C_{bx} = concentração de ar pontual a x cm do pseudo-fundo; L_i = comprimento desde o início da ogiva até o ponto de estudo; L_a = Comprimento desde o início da ogiva até o ponto de início de aeração; F^* = número de Froude rugoso do escoamento; α = inclinação da calha; $s' = \frac{L_i - L_a}{h_a}$; h_a = altura da lâmina d'água no ponto de início de aeração; $F_s = F^* \times \cos^{1,5} \phi$.

Matos (1999) mediu a distribuição da concentração de ar em diversos perfis de seções transversais ao longo de uma calha em degraus submetida a escoamento com aeração natural. A Figura 12 apresenta esses perfis para as vazões de 80 e 200 l/s. Observando seus resultados, o autor identificou três trechos com características semelhantes de concentração de ar ao longo da calha. O primeiro trecho, a montante do ponto de início de aeração, possui concentração de ar junto ao fundo praticamente nula e grande aumento da concentração de ar conforme o ponto analisado se aproxima da superfície livre do escoamento. O segundo trecho, imediatamente a jusante do ponto de início de aeração, é caracterizado pelo aumento significativo da concentração de ar ao longo da calha, considerando-se seções à mesma distância do fundo da calha. E o terceiro trecho, situado em posições mais para jusante da calha, possui variação gradual da concentração de ar em pontos com mesma distância do fundo, correspondendo ao trecho de escoamento gradualmente uniforme. O autor verificou que para a vazão de 80 l/s, o perfil de concentração de ar se assemelha ao perfil referente ao trecho de escoamento quase uniforme, utilizando como referência

a formulação de Wood⁵ (1984 apud MATOS, 1999). Para vazões elevadas, espera-se que o regime de escoamento quase uniforme não seja alcançado.

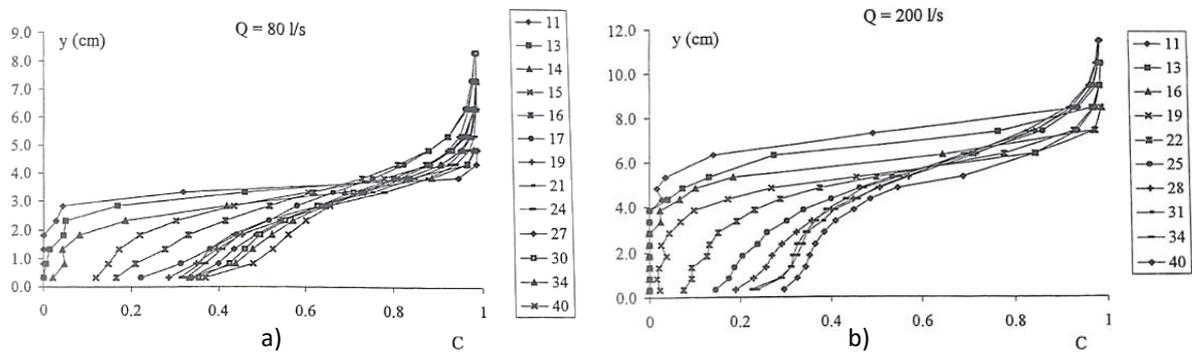


Figura 12 – Perfis de concentração de ar para diversas seções transversais ao longo da calha em degraus para as vazões: a) 80 l/s e b) 200 l/s. (fonte: MATOS, 1999)

Matos (1999) também determinou a Equação 20 para obtenção dos valores do parâmetro $\gamma' \cos\theta$, a ser aplicado no modelo de Wood (1984 apud MATOS, 1999), apresentado pela Equação 21 e pela Equação 22 com o objetivo de obter a concentração pontual em diferentes distâncias do fundo da calha a partir da concentração média de ar no escoamento.

$$\gamma' \cos\theta = 1,437 - 2,635C_a^{5/2} + \frac{1,114}{C_a} \quad \text{Equação 20}$$

$$C = \frac{\beta'}{\beta' + e^{-\gamma' \cos\theta \gamma'^2}} \quad \text{Equação 21}$$

$$\beta' = 9e^{-\gamma' \cos\theta} \quad \text{Equação 22}$$

Onde: C_a = concentração média de ar; C = Concentração pontual de ar; β' e $\gamma' \cos\theta$ = parâmetros da distribuição de ar.

⁵ WOOD, I. R. Air entrainment in high speed flows. In: Symp. Os Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, IAHR, Esslingen am Neckar, Set. Alemanha, ed. H. Kobus, Paper 4.1, pp. 4.1-1-4.1.7. 1984.

4 CAVITAÇÃO

O fenômeno da cavitação pode ser definido pela formação da fase de vapor em um líquido, podendo ocorrer formação de bolhas ou cavidades de vapor. Sua ocorrência está relacionada à redução das pressões até um valor crítico próximo à pressão de vapor da água. As bolhas ou cavidades de vapor, originadas em zonas de baixa pressão, são levadas juntamente com o escoamento e, ao atingirem locais com pressões mais elevadas, entram em colapso, o que pode ocorrer de diferentes formas, dependendo do local do escoamento. Segundo Falvey (1990), se a bolha estiver próxima a uma superfície, o fluxo é restringido e a bolha sofre uma deformação do lado oposto à superfície, então, o chamado microjato a penetra no sentido da deformação para a superfície, deixando-a com o formato de uma toróide. O microjato pode atingir altas velocidades e incidir sobre a superfície da estrutura provocando danos (Figura 13a). Depois disso a bolha, em formato de toróide, volta a se unir em uma forma esférica e pode entrar em colapso novamente. Caso a bolha não esteja próxima a uma superfície, o processo de colapso consiste na redução do seu diâmetro até um valor mínimo e sua subsequente expansão. Esse processo pode se repetir por alguns ciclos. A expansão gera ondas de choque que também podem atingir a superfície causando danos (Figura 13b).

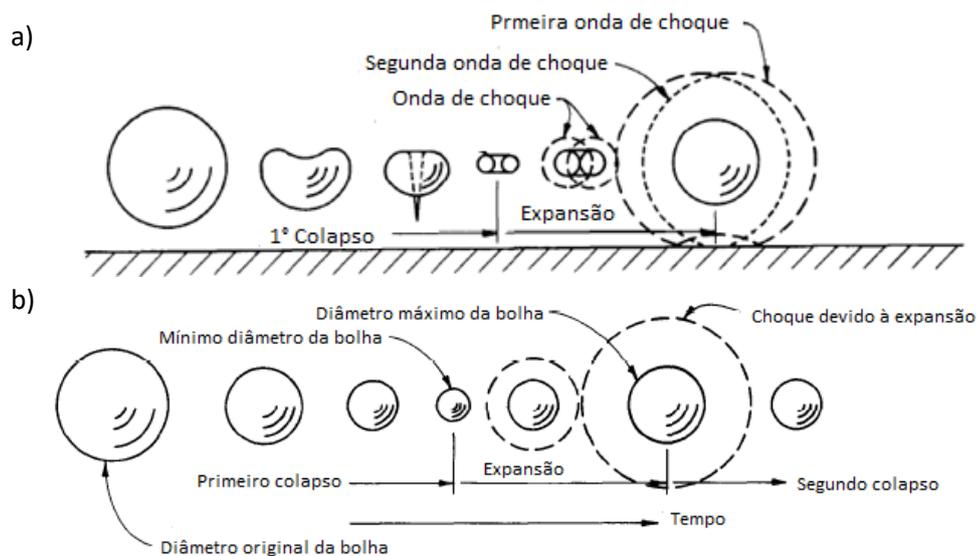


Figura 13 – Colapso de uma bolha de vapor, (a) próxima a uma superfície, (b) pura. (fonte: adaptado de FALVEY, 1990)

De acordo com Lopardo (1982), os riscos de cavitação se elevam com a presença de depressões instantâneas devidas a pulsos de pressões de baixa frequência ainda que, na média, as pressões sejam superiores à pressão de vapor do

líquido e até a pressão atmosférica. Lopardo (1996), a partir de estudos em modelo e protótipo, recomenda que as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência sejam verificadas e comparadas com a pressão de vapor da água. Segundo o autor, a presença de danos importantes nas estruturas de concreto submetidas a escoamentos macro turbulentos está relacionada a uma alta probabilidade de alcançar a pressão de vapor com as pressões extremas.

Para Arndt (1981) o parâmetro fundamental para descrição da cavitação é o índice de cavitação (Equação 23). Segundo Falvey (1990), este é um parâmetro que indica o estado da cavitação no fluxo, quanto menor é o índice de cavitação, mais crítico é o fenômeno. A Figura 14 apresenta o desenvolvimento da cavitação de acordo com os índices de cavitação atribuídos.

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_m^2} \quad \text{Equação 23}$$

Onde: P – Pressão característica (pressão local + pressão atmosférica) (Pa); P_v – Pressão de vapor do líquido (Pa); v_m – velocidade média do fluxo (m/s); ρ – massa específica da água (kg/m^3).

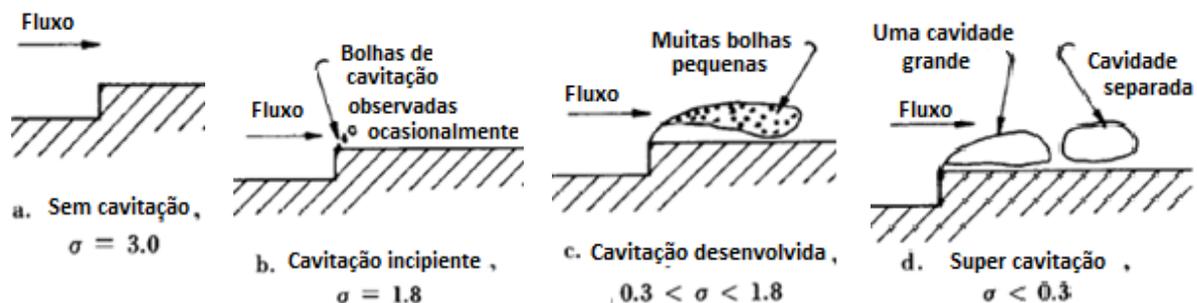


Figura 14 – Desenvolvimento da cavitação. (fonte: FALVEY, 1990)

Para verificar o risco de danos por cavitação, alguns autores estabelecem um valor de índice crítico de cavitação (σ_{cr}), que corresponde ao valor limite do parâmetro para o início do fenômeno. Sendo assim, valores mais baixos que σ_{cr} indicam a ocorrência de cavitação.

4.1 CAVITAÇÃO EM VERTEDOUROS DE CALHA LISA

De acordo com Falvey (1990), a água limpa, ou seja, sem a presença de impurezas, pode suportar pressões negativas extremas sem formação de cavitação. Em uma superfície lisa, a cavitação geralmente ocorre devido à presença de impurezas na água ou irregularidades na superfície. Algumas irregularidades citadas pelo autor são: degraus, curvaturas abruptas, ranhuras, superfícies rugosas e juntas

protuberantes. Nesses casos a cavitação é formada pela turbulência na zona de tangência entre a superfície e a irregularidade, devido à repentina mudança na direção do fluxo. Dependendo da forma da irregularidade, as bolhas podem entrar em colapso e causar danos nas suas proximidades. O autor propõe que o índice crítico para que a calha esteja segura contra ocorrência de danos por cavitação é 0,2. A Figura 15 apresenta danos causados por cavitação na barragem de Karum (1977/1978).

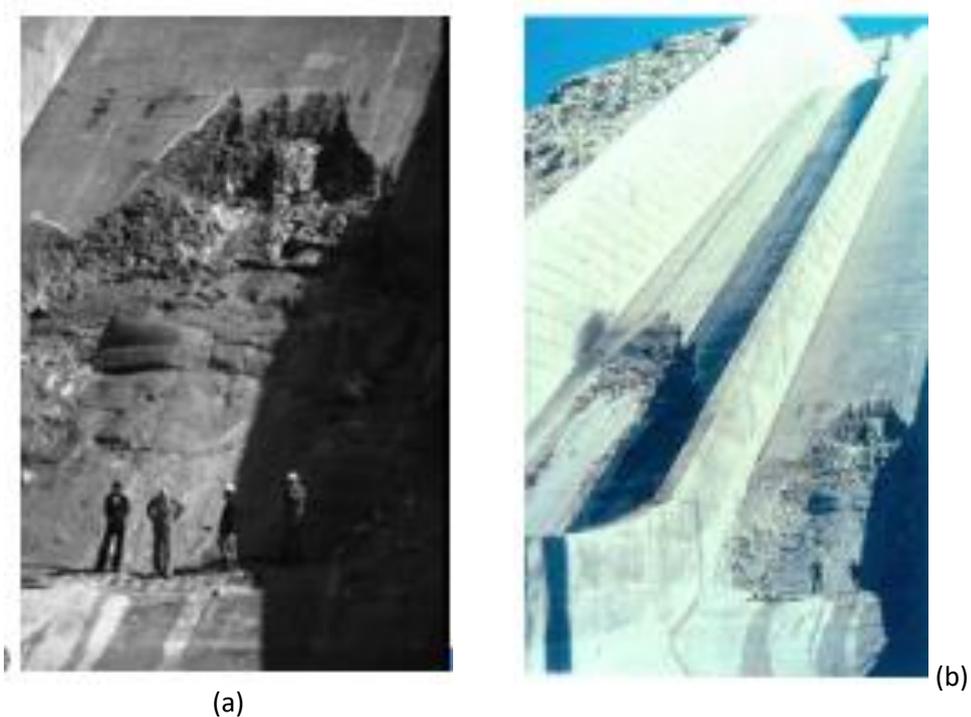


Figura 15 – Prejuízos ocasionados pela cavitação na barragem de Karum. (fonte: SIMÕES, 2008 E SIMÕES 2012).

4.2 CAVITAÇÃO EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS

O escoamento sobre vertedouros em degraus, a partir do ponto de início de aeração, se torna uma mistura bifásica do tipo ar-água cuja concentração de ar pode evitar danos por cavitação. Por outro lado, a montante do ponto de início de aeração, o escoamento sobre vertedouros em degraus possui concentração de ar insignificante nas regiões próximas ao fundo do canal e, dependendo das características da estrutura e do escoamento, pode estar sujeita à ocorrência de danos por cavitação. Segundo Terrier (2016) vertedouros em degraus estão mais propensos a sofrer cavitação do que calhas lisas devido à saliência dos degraus. A região mais propensa à ocorrência de cavitação em um escoamento sobre vertedouro em degraus se localiza imediatamente antes do ponto de início de aeração, nos espelhos dos

degraus, devido às velocidades elevadas e pressões extremas mínimas inferiores, como demonstrado no item 3.4.

O índice crítico de cavitação (σ_{cr}) em vertedouros em degraus foi estudado por diferentes autores. Frizell et al. (2013) realizaram experimentos em um modelo de vertedouro em degraus inserido em uma câmara de baixa pressão para o estudo da ocorrência de cavitação. Os autores consideraram que o σ_{cr} ocorreu no momento em que se observou mudança de direção na curva entre contagem de ruídos x índice de cavitação, resultando em σ_{cr} entre 0,3 e 0,4 para calhas com declividade de 21,8° e de 0,62 a 0,64 para calhas com declividade de 68,2°, como pode-se observar na Figura 16. Observando a figura, também se pode notar que o início dos ruídos se dá quando o índice de cavitação é cerca de 0,9. Segundo os autores, o intenso cisalhamento que pode ser observado junto às quinas dos degraus é um fator determinante para a formação de cavitação nessas regiões. A partir dos testes, foi observada a formação de cavitação para algumas situações, como apresentado na Figura 17.

Pfister e Boes (2014) sugerem σ_{cr} entre 0,5 e 0,7 para calhas em degraus com declividade de 50° e Boes (2012, apud Pfister e Boes, 2014) recomendam a consideração de um σ_{cr} de 0,5 para calhas em degraus com até 55° de declividade.

Pfister et al (2006a) utilizam como σ_{cr} para uma calha em degraus, o valor indicado por Falvey (1990) para um degrau único, que é 0,9. Esse valor coincide com o valor de início da ocorrência de ruído no estudo de Frizell et al. (2013).

Percebe-se que os autores que estudaram o índice de cavitação crítico para calhas com declividades parecidas ($\approx 50^\circ$) obtiveram índices de cavitação entre 0,5 e 0,64.

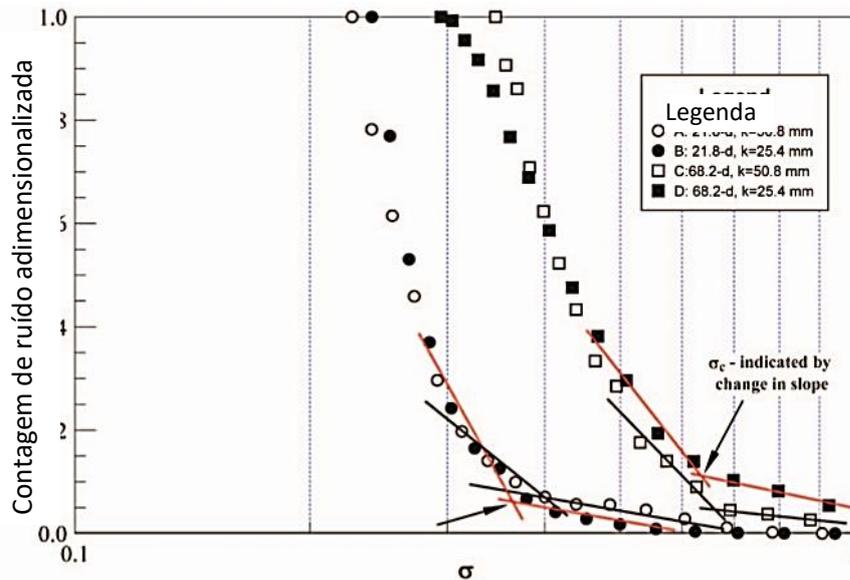


Figura 16 – Contagem de ruído associado à cavitação adimensionalizada em função do índice de cavitação calculado pela Equação 23 (fonte: FRIZELL et al. 2013)

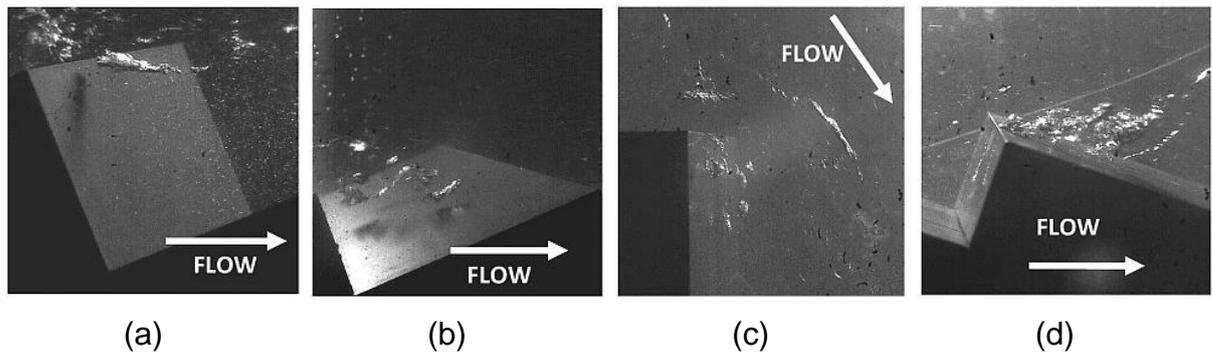


Figura 17 – Imagens obtidas por câmera de alta velocidade para as condições de: (a) $K=50,8$ mm, $\sigma = 0,39$ e $\phi=21,8^\circ$; (b) $K=25,4$ mm, $\sigma=0,37$ e $\phi = 21,8^\circ$; (c) $K=50,8$ mm, $\sigma=0,67$ e $\phi = 68,2^\circ$; (d) $K=25,4$ mm, $\sigma = 0,63$ e $\phi = 68,2^\circ$ (fonte: FRIZELL et al., 2013).

Diversos autores se dedicaram a estudar a vazão de escoamento limite em vertedouros em degraus com garantia da não ocorrência de cavitação. Para Boes e Hager (2003), o início do fenômeno da cavitação ocorre com velocidades a partir de 20 m/s o que corresponde a 25 m³/s/m. Amador (2005) determinou que o índice de cavitação crítico para um vertedouro em degraus com inclinação de 1V:0,8H e degraus de 0,9 m de altura fica entre os valores de 0,74 e 0,83. A partir desse índice, o autor definiu que o intervalo de vazões entre 11,5 m³/s/m e 14 m³/s/m é o limite para a inexistência de riscos de cavitação.

Gomes (2006) determinou um índice crítico de cavitação (σ_{cr}) de aproximadamente 0,65 e, a partir de modelos teórico-experimentais, determinou que as vazões específicas limites para ocorrência de cavitação ficam entre 11,3 e 15,6 m³/s/m. O limite inferior (11,3 m³/s/m) foi obtido para uma calha com degraus de

3 cm de altura e o limite superior (15,6 m³/s/m) para a calha com degraus de 9 cm de altura.

Osmar (2016) calculou o índice crítico de cavitação e o índice de cavitação e concluiu que não houve risco de cavitação até a vazão máxima ensaiada (equivalente em protótipo a 9,49 m³/s/m).

Novakoski et al. (2018) consideraram que o início da cavitação ocorre quando $\frac{P_{0.1\%}}{\gamma} = -10.09$ m (pressão de vapor da água à 20°). A partir dos dados obtidos por Osmar (2016), os autores determinaram que, para a faixa de vazões entre 10,6 m³/s/m e 17,2 m³/s/m, existe risco de ocorrência de cavitação e, para vazões maiores que 17,3 m³/s/m, a ocorrência de cavitação é provável. A Tabela 3 apresenta um resumo das vazões limites para que exista risco de ocorrência de cavitação conforme os autores citados.

Tabela 3 – Resumo das vazões limites para ocorrência de cavitação de acordo com diferentes autores.

Autor	Vazão limite para riscos de ocorrência de Cavitação
Boes e Hager (2003)	A partir de 25 m ³ /s/m
Amador (2005)	11,5 a 14 m ³ /s/m
Gomes (2006)	11,3 a 15,6 m ³ /s/m
Novakoski et al. (2018)	10,6 a 17,2 m ³ /s/m

No Brasil, alguns vertedouros em degraus de barragens foram dimensionados para vazões mais altas do que as recomendadas pelos autores citados na Tabela 3, por exemplo, UHE Dona Francisca, cujo vertedouro foi projetado para vazões específicas de 31,7 m³/s/m (ICOLD, 2009), porém, segundo registros cedidos pela empresa (Dona Francisca Energética S.A.), a máxima vazão escoada foi de 23 m³/s/m. É importante salientar que a ocorrência de danos não está somente relacionada à magnitude da vazão escoada, mas também ao tempo em que a estrutura esteve submetida a essas vazões. Os registros indicam que a usina esteve submetida à vazão de 23m³/s/m por 2 horas e a vazões superiores a 17 m³/s/m por 9 horas⁶. A Figura 18 apresenta alguns danos e reparos que foram realizados na UHE Dona Francisca que podem ter ocorrido durante a passagem da cheia máxima registrada devido à ocorrência de cavitação.

⁶ Dados fornecidos por Dona Francisca Energética S.A.

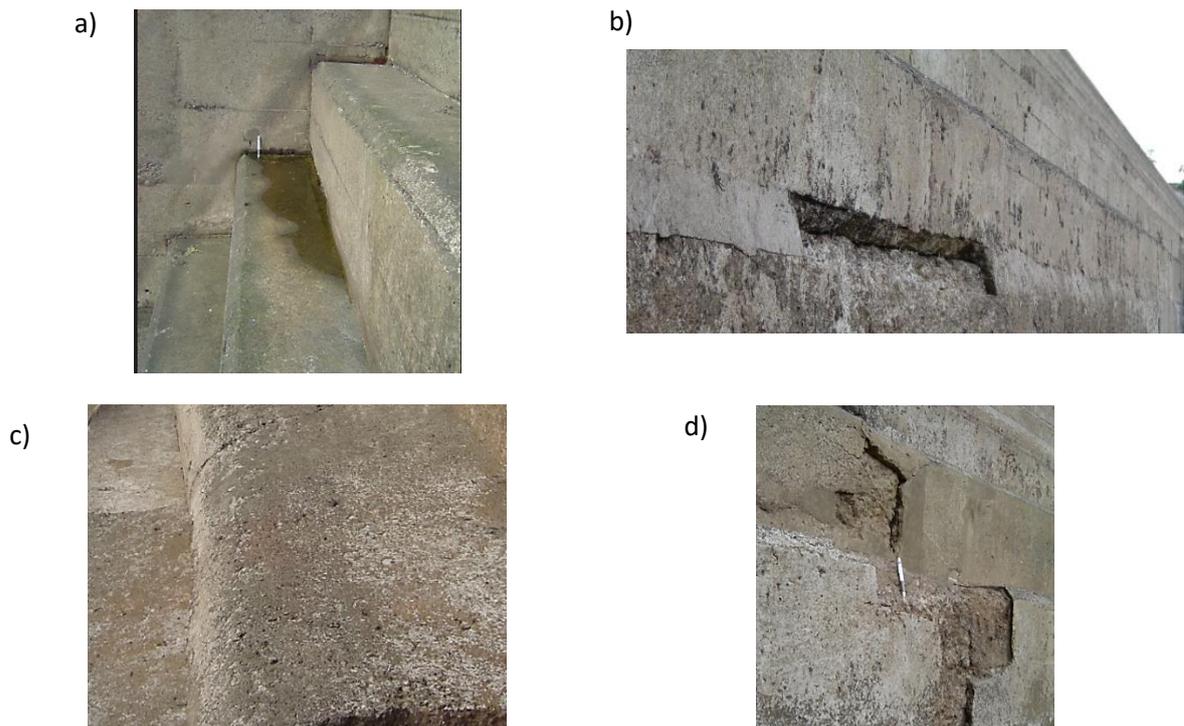


Figura 18 – Danos (a, c e d) e reparos (b) reparos removido pelo escoamento na UHE Dona Francisca. (fonte: fotos cedidas por Dona Francisca Energética S.A.)

É válido salientar que, segundo Eletrobrás (2003), barragens com mais de 30 m de altura devem utilizar como vazão de projeto a vazão Maximorum (vazão correspondente a 10.000 de período de retorno). O que significa que a estrutura deve suportar a cheia máxima provável. No meio técnico os projetistas costumam utilizar a vazão com tempo de recorrência de 100 anos ou a vazão média como limite para que os vertedouros das barragens não sofram danos por cavitação. Dessa forma, na ocorrência de vazões mais altas (entre a vazão de 100 e de 10.000 anos de período de retorno), o vertedouro será capaz de escoar a água excedente, porém é possível que sejam necessários reparos após a passagem do escoamento.

Como existe uma tendência à construção de vertedouros com vazões elevadas e como a utilização de vertedouros em degraus está associada a vantagens de dissipação de energia e facilidade de construção, existe um interesse crescente em ampliar a magnitude das vazões escoadas por essas estruturas sem risco de danos por cavitação. Uma medida que vem sendo estudada com esse objetivo é a aeração induzida, que consiste na pré-aeração do escoamento através da inserção de elementos aeradores na calha.

4.3 AERAÇÃO COMO SOLUÇÃO CONTRA DANOS POR CAVITAÇÃO

De acordo com autores como Peterka (1953), Semenov e Lentyaev (1973) e Volkart e Rutschman (1984), a inserção de ar para o interior do escoamento faz com que sua compressibilidade aumente, protegendo o concreto de danos por cavitação. Dessa forma, as bolhas de ar formadas são capazes de absorver as ondas geradas pelo micro jato produzido através da implosão das bolhas de vapor. Segundo Falvey (1990), isso ocorre devido a, em um líquido, as ondas longitudinais se propagarem na velocidade do som e que a presença de bolhas de ar no interior do escoamento reduz essa velocidade. Nesse caso, a presença de ar no escoamento reduz também a velocidade das ondas geradas pelo microjato oriundo do colapso das bolhas de vapor.

Muitos estudos já foram desenvolvidos com o intuito de quantificar a concentração de ar necessária ao escoamento para que o concreto esteja protegido dos danos por cavitação. Peterka (1953) realizou estudos relacionando a concentração de ar com a perda de massa de corpos de prova de concreto submetidos à escoamentos com e sem injeção de ar. Seus testes foram desenvolvidos em um conduto fechado com um estrangulamento para criar condições de cavitação como mostra a Figura 19. Cada corpo de prova ficou submetido ao escoamento por 2 horas. Como resultado, o autor elaborou o gráfico apresentado na Figura 20 que relaciona a concentração de ar (relação entre volume de ar e de água) com a perda de peso dos corpos de prova. A partir da Figura 20 observa-se que concentrações de ar a partir de 2% reduzem significativamente a erosão por cavitação e que, em escoamentos com concentrações de ar acima de 7,4%, não foram observados danos por cavitação. Analisando o gráfico de Peterka (1953), Matos (1990) sugere que, para uma eficiente proteção da superfície de concreto, é necessária uma concentração de ar de 6 a 8%. Peterka (1953) também avaliou a influência da aeração no índice de cavitação através de medições de pressões médias logo após o estrangulamento da tubulação. Através da Figura 20 pode verificar-se que o índice de cavitação aumentou com o acréscimo da concentração de ar, representando menor tendência à ocorrência de cavitação.

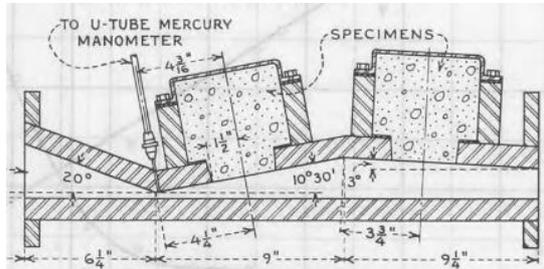


Figura 19 – Esquema do modelo utilizado por Peterka (1953) para realização de seus ensaios (fonte: PETERKA, (1953))

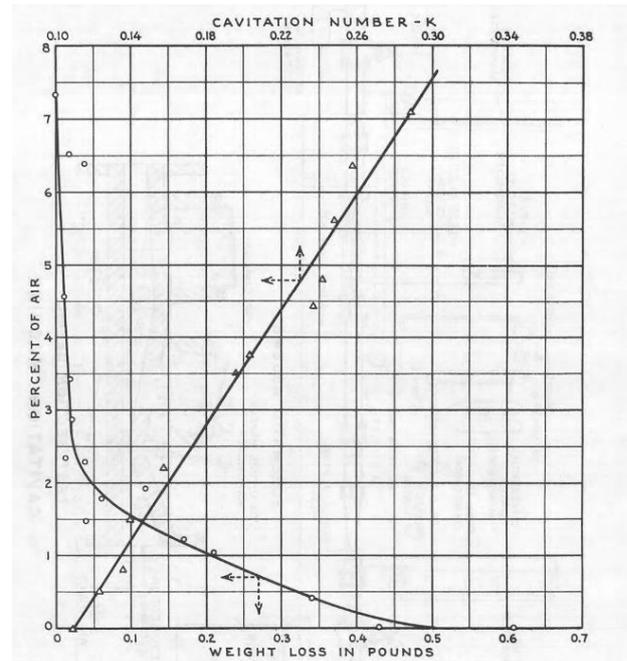


Figura 20 – Concentração de ar em função da perda de massa de corpos de prova de concreto. (fonte: PETERKA (1953))

Semenkov e Lentyaev (1973), através dos dados expostos por Galperin et al. (1971), cujos ensaios foram realizados através de câmaras de alta velocidade, indicam que a concentração de ar necessária à proteção do concreto à cavitação aumenta conforme a resistência do concreto diminui. É apresentada a concentração de ar necessária para evitar danos por cavitação de acordo com a resistência do concreto, porém, os autores denominam concentração de ar a relação Q_{ar}/Q_{ag} . A Tabela 4 apresenta a concentração de ar necessária para evitar danos por cavitação de acordo com a resistência do concreto, segundo Semenkov e Lentyaev (1973) ($C^* = Q_{ar}/Q_{ag}$), e a concentração de ar, segundo o presente trabalho ($C = Q_{ar}/(Q_{ag} + Q_{ar})$) de acordo com a Equação 9. Como a vazão de ar é pequena comparada à vazão de água, os valores de C e de C^* não apresentam variações significativas, sendo a maior de 10% para o concreto com 100 kg/cm².

Tabela 4 – Concentração de ar necessária para evitar danos por cavitação relacionada com a resistência do concreto (fonte: adaptado de Semenkov e Lentyaev, 1973).

Kg/cm ²	100	150	200	250	300	350	400
C^* (%)	9,7	8,0	6,8	5,7	4,7	4,0	3,0
C (%)	8,8	7,4	6,4	5,4	4,5	3,8	2,9

Russel e Sheehan (1974), através de ensaios com corpos de concretos de diferentes resistências concluíram que 5% de concentração de ar é suficiente para

evitar danos por cavitação em situações em que eles ocorreriam mesmo com concretos de altas resistências. Segundo os autores, mesmo se o concreto possuir baixa resistência, se o escoamento possuir 5% de concentração de ar, não serão observados danos por cavitação.

Além da propriedade de proteção ao concreto contra danos por cavitação devido às mencionadas características, alguns estudos demonstraram também que a presença de ar tende a elevar as pressões desenvolvidas no escoamento e, conseqüentemente, do índice de cavitação. Essa elevação das pressões e do índice de cavitação pode colaborar com a não ocorrência do fenômeno de cavitação dependendo das características do escoamento.

U.S. Army Corps of Engineers (1990), relacionado a investigações em vertedouros com calhas lisas, indicam que foram realizadas medições de pressões junto ao fundo em protótipos com e sem aeração e foram identificados acréscimos nas pressões instantâneas para a situação de escoamento aerado. Pressões que estavam próximas à pressão de vapor da água para escoamento sem a introdução de ar passaram a valores próximos à pressão atmosférica para a situação de escoamento aerado, elevando em até 50% o índice de cavitação no local.

Dong et al (2007) realizaram medições de pressões e calcularam o índice de cavitação em um conduto com escoamentos com velocidades entre 20 e 50 m/s e obtiveram os resultados expostos na Figura 21 referentes à relação da pressão e índice, principalmente de cavitação relacionados à concentração de ar no escoamento. Através desses resultados, os autores concluíram que o aumento da concentração de ar ocasiona um aumento significativo das pressões médias e, conseqüentemente, do índice de cavitação.

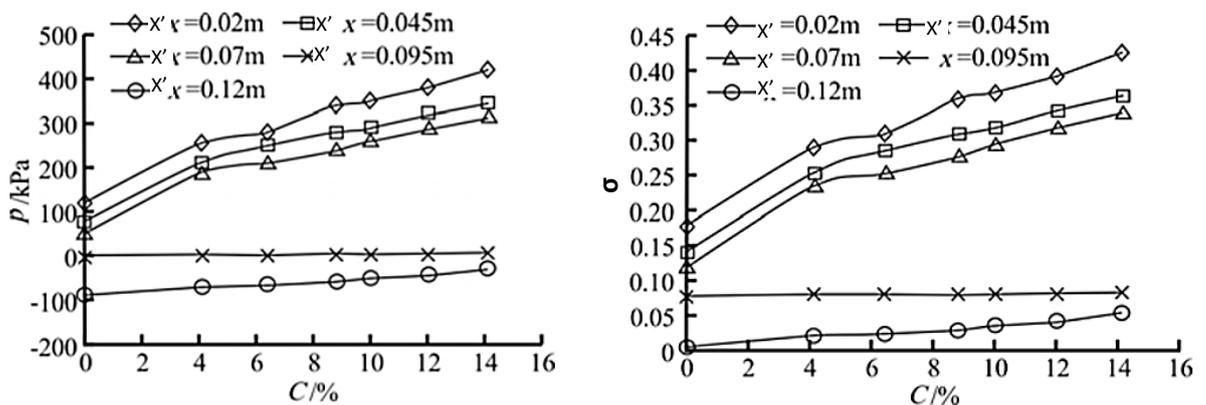


Figura 21 – Relação das pressões e do coeficiente de cavitação com a concentração de ar no escoamento segundo Dong et al.(2007) (fonte: DONG et al., 2007)

5 AERAÇÃO INDUZIDA

Como já foi destacado nos capítulos anteriores, a aeração induzida em vertedouros de barragens consiste na pré-aeração do escoamento com o objetivo de reduzir os danos por cavitação. Segundo May (1992), as primeiras instalações de elementos aeradores registradas foram realizadas nas barragens Grand Coulee e Yellowtail, na década de 60, ambas nos E.U.A., com vertedouros em túnel. Depois disso, aeradores foram instalados em diversos vertedouros pelo mundo. Nos vertedouros de calha lisa, essa prática já é bastante difundida, porém, nos vertedouros em degraus é recente e acredita-se que pode resultar na ampliação da faixa de vazões admissíveis nas estruturas.

5.1 TIPOS DE AERADORES

De acordo com Volkart (1983), os aeradores de fundo produzem um local de queda de pressão succionando o ar para o interior do escoamento. Algumas formas de aeradores que cumprem os objetivos de proporcionar a entrada de grandes quantidades de ar ao escoamento e possuir um desenho simples e econômico são: ranhuras, defletores, degraus e combinações entre elas (Figura 22). A Figura 23 explica como ocorre a entrada de ar por um aerador do tipo defletor, as demais formas proporcionam entrada de ar pelos mesmos princípios, porém com diferentes dimensões de zonas e características de entradas de ar.

Segundo o mesmo autor, os defletores foram utilizados inicialmente como medida corretiva em vertedouros existentes. A vantagem relacionada é o significativo comprimento do jato formado mesmo para pequenas alturas de defletores. Sua desvantagem é o intenso impacto do jato no fundo da calha e a pequena faixa de vazões associadas à ótima demanda de ar. Segundo Falvey (1990), o jato formado deve impactar a jusante da área com menor índice de cavitação.

Já os degraus têm como vantagem um menor impacto do jato, porém, como a demanda de ar é reduzida para pequenas e mais frequentes vazões, essa forma geralmente é combinada com um pequeno defletor. As ranhuras, mais utilizadas em túneis ou após comportas, permitem a entrada de ar no escoamento através de profundas fendas, sua principal desvantagem é a pequena demanda de ar devido à pequena exposição do fluxo com o ar (VOLKART E RUTSCHMANN, 1984).

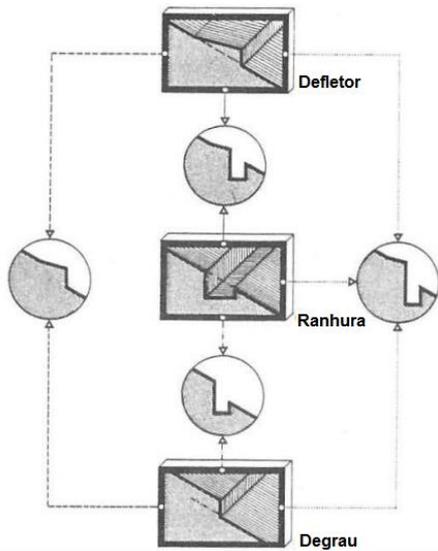


Figura 22 – Tipos de aeradores (fonte: adaptado de VOLKART e RUTSCHMANN, 1984).



Figura 23 – Processo de entrada de ar através de um aerador do tipo defletor (fonte: adaptado de VOLKART e RUTSCHMANN, 1984).

Observa-se pela Figura 23 que o fluido deixa o defletor no início da zona de cisalhamento onde forças de cisalhamento atuam na parte inferior do escoamento. Após essa região, a sucção de ar para a cavidade formada e a instável superfície inferior do escoamento propiciam a entrada de ar no fluido na zona de spray. Na zona de mistura, o impacto do jato no fundo da calha pode proporcionar a entrada de uma quantidade adicional de ar no escoamento. Na zona de desaeração, a concentração de ar no fundo da calha se reduz devido ao deslocamento das bolhas de ar em direção à superfície. Para que a entrada de ar no escoamento seja contínua, é necessário que exista um fornecimento, também contínuo, de ar. Falvey (1990) indica alguns métodos de fornecimento de ar (Figura 24).

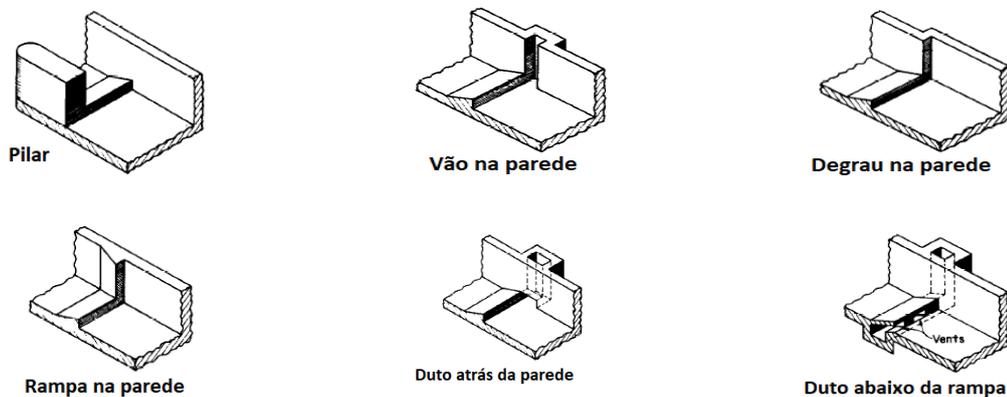


Figura 24 – Métodos de propiciar a continuidade da entrada de ar em aeradores (fonte: Adaptado de FALVEY, 1990).

É imprescindível que o fornecimento de ar esteja dimensionado de acordo com as características do aerador e do escoamento. Marcano e Castillejo⁷ (1984 apud Kokpinar e Gogus, 2002) apontam que, caso a subpressão na cavidade seja muito intensa, pode ocorrer uma submergência no aerador.

5.2 AERAÇÃO INDUZIDA EM VERTEDOUROS COM CALHA LISA

Em vertedouros, segundo Matos (1990), a incorporação de ar ao escoamento pode se dar através da superfície livre ou por dispositivos aeradores. A proteção decorrente da penetração do ar através da superfície livre de um escoamento está limitada a vazões específicas reduzidas, já que, para vazões maiores, a quantidade de ar incorporada não é suficiente. Sendo assim, muitas vezes, a solução encontrada é utilizar a introdução artificial de ar através de aeradores de fundo.

A primeira barragem de calha lisa onde foram utilizados aeradores foi a Barragem Bratsk, localizada na Rússia. Volkart (1983) descreve que a barragem, com declividade do vertedouro de 1:0,8, possui aeradores do tipo defletores com altura de 0,45 m. As distâncias entre os aeradores são de 41,4 m e 33,7 m (MAY, 1992).

Segundo Pfister e Hager (2010b), após a ocorrência de danos por cavitação em barragens como Karun no Irã e Keban na Turquia, entre 1970 e 1980, a aeração do escoamento foi considerada a medida mais eficiente contra esse tipo de dano. Matos (1990) cita alguns casos de barragens em que foi aplicada a aeração induzida: Foz de Areia e Emborcação, no Brasil, Guri, na Venezuela e Tarbela, no Paquistão. A partir de então, vários estudos foram realizados no âmbito da aeração induzida, sendo estudados diversos tipos e dimensões de aeradores e parâmetros como a demanda e concentração de ar, o comprimento do jato, entre outros.

5.3 AERAÇÃO INDUZIDA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS

Os vertedouros em degraus possuem como vantagem o desenvolvimento facilitado da aeração em relação aos vertedouros de calha lisa devido à macro rugosidade proporcionada pelos degraus.

⁷ MARCANO, A; CASTILLEJO, N. Model-prototype comparison of aeration devices of Guri Dam spillway. In Proceedings of a Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, International Association for Hydraulic Research, Esslingen, Germany, 3-6 Sept. 1984. Edited by H. Kobus. Sprint Duck, Stuttgart, Germany. pp. 4.6.1-4.6.5.

Porém, como visto nos capítulos anteriores, sua utilização está limitada a vazões da ordem de 15 a 20 m³/s/m devido aos acentuados riscos de ocorrência de cavitação para vazões maiores, enquanto vertedouros de calha lisa podem suportar, segundo Pfister et al. (2006a), vazões próximas a 100 m³/s/m. Com o propósito de elevar o limite de vazões nos vertedouros em degraus, diferentes autores têm se dedicado ao estudo da aeração induzida por elementos aeradores nessas estruturas.

Atualmente se tem registros da utilização de aeração induzida em algumas barragens com vertedouros em degraus em operação na China, utilizando pilares como elementos aeradores. Como exemplos, pode-se citar a Shuidong dam e Dachashan dam (DONG ET AL., 2019 e FRIZELL ET AL., 2015).

5.4 DEMANDA RELATIVA DE AR

Ruschmann e Hager (1990) definiram que a demanda relativa de ar (Equação 24) é função do número de Froude de aproximação (Equação 25), do número de Euler (Equação 26), da altura relativa do defletor (Equação 27), da altura relativa do degrau (caso se utilize um defletor tipo degrau) (Equação 28) e das inclinações da calha (ϕ) e do defletor (θ). Gaskin et al. (2003) estudaram uma calha lisa com aerador do tipo defletor mais ranhura e concluíram que a demanda de ar cresce conforme o número de Froude de aproximação aumenta até um limite de demanda de ar $\beta \approx 0,4$ a $0,45$, que é atingido com um valor aproximado de $F_{ro} \approx 12$. Seu estudo também indicou que a influência da declividade do defletor na demanda de ar também depende do número de Froude, sendo que pequenas declividades de defletores apresentam maiores $\frac{d\beta}{d\theta}$ para maiores números de Froude e, inversamente, menores declividades representam maiores $\frac{d\beta}{d\theta}$ para menores números de Froude.

Zamora et al. (2008) estudaram uma calha em degraus com aeração induzida através de um duto de ar conectado com a atmosfera e, assim como Pfister et al. (2006a) que estudou a entrada de ar através de defletor, também em calha em degraus, concluíram que o menor número de Froude de aproximação para que se perceba entrada de ar é de 2,7.

Pfister e Hager (2010a) estudaram a entrada de ar através de defletor e degrau instalados em uma calha lisa e concluíram que, para ambos os elementos aeradores, β aumenta com o número de Froude e com a declividade do defletor. O número de Froude de aproximação mínimo indicado pelos autores para que exista a entrada de

ar é de aproximadamente 5 para um defletor de 5,7° de inclinação e de aproximadamente 4 para um defletor de 11,3° de declividade.

Terrier (2016), ao estudar a entrada de ar induzida em um escoamento sobre vertedouros em degraus, concluiu que a entrada de ar tem início em escoamentos com número de Froude de aproximação a partir de 2,0 utilizando defletor com 10° em uma calha de 50° de declividade. Para uma calha com declividade de 30° com o mesmo defletor, esse valor passa para 2,5.

Percebe-se que os valores de número de Froude de aproximação mínimos para entrada de ar indicados por Terrier (2016), Pfister et al. (2006a) e Zamora (2008) são próximos e inferiores ao indicado por Pfister e Hager (2010a). A principal diferença entre os estudos desses autores é o tipo de calha, Pfister e Hager (2010a) estudaram a inserção de ar em calha lisa e os demais, em degraus. Porém, como a demanda relativa de ar é medida anteriormente ao contato do escoamento com os degraus, imagina-se que não seja esse o motivo da diferença identificada. O tipo de aerador também é diferente entre os três trabalhos, sendo o utilizado por Pfister et al. (2006a) o mais próximo ao estudado na presente pesquisa. A Tabela 5 apresenta equações elaboradas por diversos autores para estimativa da demanda relativa de ar, em calhas lisas e em degraus, e as características e limitações de suas aplicações.

$$\beta = \frac{Q_{ar}}{Q_{ag}} \quad \text{Equação 24}$$

$$F_{ro} = \frac{v_o}{(g \cdot h_o)^{1/2}} \quad \text{Equação 25}$$

$$E_o = \frac{v_o^2}{(\Delta_p / \rho)} \quad \text{Equação 26}$$

$$\frac{t}{h_o} \quad \text{Equação 27}$$

$$\frac{t_r}{h_o} \quad \text{Equação 28}$$

Onde: β =Demanda relativa de ar; Q_{ar} = vazão de ar incorporada ao escoamento (m³/s); Q_{ag} =vazão de água (m³/s); F_{ro} =Número de Froude de aproximação; V_o =velocidade média de aproximação (m/s); g =aceleração da gravidade (m/s²); h_o =profundidade de aproximação medida perpendicularmente ao fundo da calha (m); E_o =número de Euler de aproximação; Δ_p =supressão abaixo do escoamento (Pa); ρ =massa específica da água (kg/m³); t =espessura do defletor (m); t_r =altura do degrau do aerador (m).

Tabela 5 – Equações para demanda relativa de ar

Autor	Equação	Características	Numeração
Rutschmann ⁸ (1988, apud RUTCHSMANN E HAGER, 1990)	$\beta = 0,0372(L_{jet} - 7,15)$	Calha lisa, defletor mais degrau 5% < ϕ < 250%, 10% < θ < 20%.	Equação 29
Kokpinar e Gogus (2002)	$\beta = 0,0189 \left(\frac{L_{jet}}{h_o}\right)^{0,83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w}\right) (1 + \tan\phi)\right]^{0,24}$	Calha lisa, defletor mais degrau: $0^\circ \leq \phi$ $\leq 9,45^\circ$; $0 \leq \tan \theta$ $\leq 1,25$; 5,56 ≤ F _o ≤ 10,00; 0 ≤ t/h _d ≤ 0,8; 0 ≤ t/h _o ≤ 0,4; 0,02 < A _a < 1; 109 ≤ W _e ≤ 182	Equação 30
Pfister e Hager (2010b)	$\beta = 0,0028F_o^2 [1 + F_{ro} \tan\alpha] - 0,1$	Calha lisa, defletor mais degrau, 0 < β < 0,80	Equação 31
Zamora (2008)	$\beta = 0,0016(F_{ro} - 2,7)^3 + 0,001$	Calha em degraus com duto de ar $\phi = 50^\circ$ 2,7 ≤ F _o ≤ 5,5	Equação 32
Chanson (1988)	$\beta = k \left[F_{ro} + 8,17 - 5,77 \frac{h_o}{o} + 0,605 \left(\frac{h_o}{o}\right)^2 - 23,51 \left(\frac{h_o}{o}\right)^{-1,5} \sqrt{\frac{4p}{\rho g h_o}} \right]$	Calha lisa, defletor mais degrau, 3 ≤ F _o ≤ 25, 0,023m ≤ h _o ≤ 0,12 m	Equação 33
Terrier (2016)	$\beta = 0,0077 \frac{L_{jet}}{h_o}$ $\beta = 0,0,13F_{ro} (1 + \sin\phi)^{1,5} (1 + \tan\theta)^3 - 0,096$	Calha em degraus, defletor, 3,2 ≤ F _o ≤ 7,5.	Equação 34 Equação 35
Ferla (2020)	$\beta = 0,194 e^{-1,117 \Psi}$ $\Psi = \frac{h_o V_0^2}{2 g Z t Fr}$	Calha em degraus, defletor, 3,0 ≤ F _{ro} ≤ 6,0	Equação 36 Equação 37

Onde: β =Demanda relativa de ar; L_{jet} =comprimento do jato de água lançado pelo defletor (m); ϕ =declividade da calha; A_a =área da tubulação de entrada de ar (m²); A_w = área molhada da calha antes do aerador (m²); θ = declividade da calha (°); θ =inclinação do defletor (°); F_{ro} = número de Froude do escoamento no início do defletor; W_e =número de Weber do escoamento no início do defletor; t = altura do defletor; h_d = altura do degrau; h_o =altura do escoamento no final da ogiva.

⁸ Rutchmann, P. (1988). "Calculation and optimum shape of spillway chute aerators." Int. Symp. On Model-Prototype Correlation os Hydr. Structures. P. H. Burgi, ed., ASCE, Aug., 118-127.

5.5 COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO, CONCENTRAÇÃO DE AR E PRESSÕES NA CALHA.

No que diz respeito à instalação de elementos aeradores em calhas lisas, diferentes autores estudaram o comportamento do jato gerado através de defletor ou defletor mais degrau instalados em uma calha lisa. A Tabela 6 apresenta algumas equações disponíveis.

Tabela 6 – Equações para estimativa da posição de impacto do jato para aeração induzida em calha lisa.

Autor	Equação	Características	Numeração
Kokpinar e Gogus (2002)	$\frac{L_{jet}}{h_o} = 0,28F_r^{1,75}(1 + \theta)^{0,22} \left(\frac{t + o}{h_o}\right)^{0,44} \left[(1 + \tan\theta) \frac{A_a}{A_w} \right]^{-0,087}$	Calha lisa, defletor mais degrau: $0^\circ \leq \theta \leq 9,45^\circ$; $0 \leq \tan \theta \leq 1,25$; $5,56 \leq F_o \leq 10,00$; $0 \leq t/h_d \leq 0,8$; $0 \leq t/h_o \leq 0,4$; $0,02 < A_a < 1$; $109 \leq W_e \leq 182$	Equação 38
Pfister e Hager (2010a)	$\frac{L_{jet}}{h_o} = 0,77F_o(1 + \text{sen}\theta)^{1,5} \left[\sqrt{\frac{o + t}{h_o}} + F_o \tan\theta \right]$	Calha lisa, defletor mais degrau, $0 < L^*/h_o < 50$	Equação 39

Onde: L_{jet} =comprimento do jato no sentido da inclinação da calha; h =altura do escoamento; h_o =profundidade de aproximação medida perpendicularmente ao fundo da calha; F_o =número de Froude do escoamento no final da ogiva; θ =declividade do defletor; ϕ =declividade da calha; t =altura do defletor; h_d =altura do degrau; A_a =área da tubulação de entrada de ar; A_w = área molhada da calha antes do aerador; h_o =profundidade do escoamento do final da ogiva; t =altura do defletor; W_e =número de Weber do escoamento; L^* = distância na calha desde a crista da ogiva até o ponto de interesse.

Quanto à presença de elementos aeradores instalados em calhas em degraus, Pfister et al. (2006a) estudaram dois tipos de defletores posicionados no final da ogiva, como mostra a Figura 25a, com fornecimento de ar pelas paredes laterais. Os autores concluíram que os escoamentos gerados por ambos apresentam comportamento semelhante, dividido em 4 zonas, como apresentado na Figura 25b. A região 1 é caracterizada pelo lançamento do escoamento para jusante da calha. Na zona A (Z_A), o escoamento é monofásico, não existindo concentração de ar. Assim que o jato é lançado, uma cavidade de ar se forma sobre os degraus (Z_B) e a concentração de ar no fundo da calha (C_b) é máxima. Após o impacto do jato na calha, já na região 2, inicia-se um rápido decréscimo de C_b cujo final ocorre na posição $Z_c/2$, independentemente da vazão escoada. Depois disso, na Z_D , C_b continua

decrecendo, porém com menor intensidade e com oscilações. Na região 3, tem-se o aumento da concentração de ar no fundo da calha devido à entrada de ar pela superfície livre (Z_E) e, finalmente, na região 4, o escoamento é quase uniforme, atingindo uma concentração de ar constante (C_{bu}). A Figura 26 mostra o esquema da concentração de ar em função das zonas mencionadas, e a Figura 27 as concentrações de ar médias no fundo da calha ($C_b(h_c/s)$) em função da posição ($n=[(z-z_c)/h_d]$), onde observam-se as características apontadas na Figura 26 com a elevação da concentração de ar ocorrendo mais para montante para vazões baixas em relação à vazões altas. A Tabela 7 apresenta as equações propostas pelo autor para determinação da posição de ocorrência e concentração de ar média no fundo do escoamento, para as regiões 1 e 2.

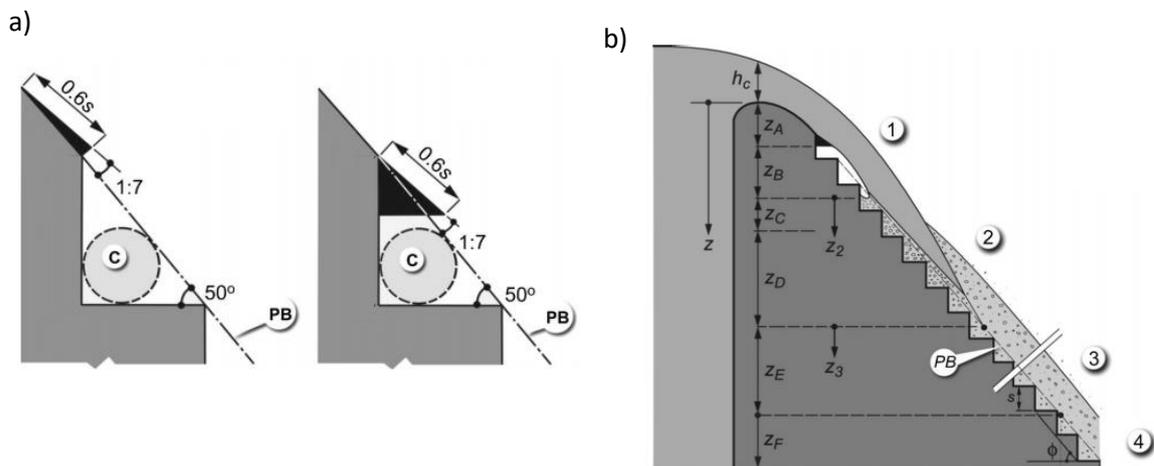


Figura 25 – Esquema do modelo utilizado por Pfister (2006a), (a) tipos de defletores e (b) zonas de escoamento. (Fonte: PFISTER, 2006a).

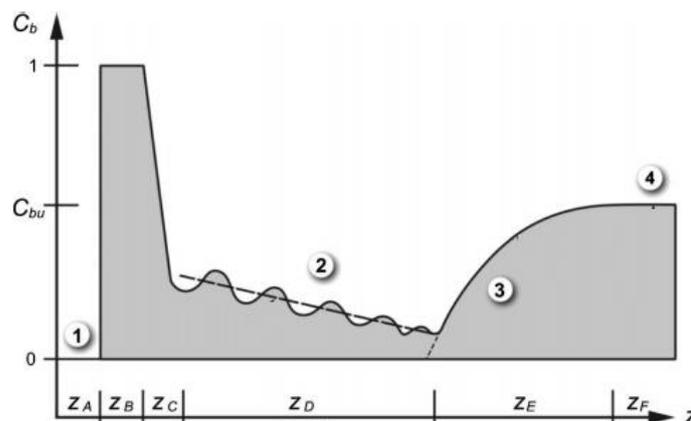


Figura 26 - Concentração de ar em função das zonas relacionadas na Figura 25 (fonte: PFISTER et al., 2006).

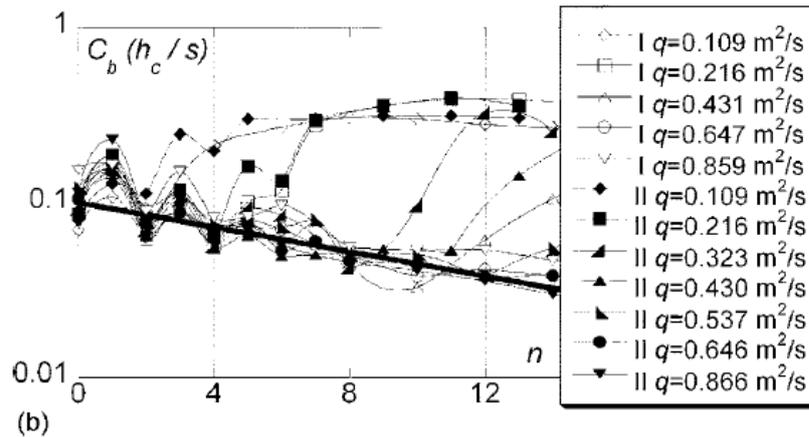


Figura 27 – Concentrações de ar médias no fundo da calha obtidas por Pfister (2006a) (fonte: PFISTER, 2006a)

Tabela 7 – Equações para concentração de ar e posição das regiões no escoamento segundo Pfister et al. (2006).

Região	Concentração de ar	Posição
1	-	$\frac{Z_B}{h_c} = 0,16 \left(\frac{h_c}{Z_A}\right)^{-2}$
2	$C_{bm} \frac{h_c}{s} = 0,1 \cdot 10^{-0,035-n}$	$\frac{Z_D}{h_d} = 1,5 \left(\frac{h_c}{h_d}\right)^2$
3	$\frac{C_b}{C_{bu}} = \tanh \left[0,22 \frac{Z_3}{h_d} \right]$ $C_{bu} = 0,268 - 5,69 \times 10^{-3}$	-

Onde: C_{bm} = concentração média de ar no fundo da calha; C_b =concentração de ar no fundo da calha; $n=(Z_2-Z_c)/h_d$; h_c = profundidade crítica do escoamento; h_d =altura do degrau.

Pfister et al. (2006b) estudaram um aerador de fundo posicionado no primeiro degrau da calha, como mostrado na Figura 28. Os autores consideram que as características de desenvolvimento do escoamento são semelhantes às apresentadas por Pfister et al. (2006a) e realizaram medições de concentração de ar ao longo da calha. A Figura 29a apresenta a concentração de ar ao longo da calha medida pelos autores a distâncias de 3 e 5 mm do pseudo-fundo, indicando que existe uma diferença significativa apenas no ponto onde a concentração de ar é máxima. Na Figura 29b está apresentada a concentração de ar no fundo da calha (C_b) relativa à concentração de ar constante (C_{bu}) para diferentes valores de h_c . Destaca-se que os valores de C_{bu} foram estimados devido à calha do modelo não ser longa o suficiente para que o escoamento atingisse o regime uniforme em todas as vazões ensaiadas. Os autores perceberam que a concentração de ar é maior para menores vazões, inclusive, para as maiores vazões, a concentração não atingiu os valores de C_{bu} em

nenhuma posição da calha. Além dessas observações, algumas outras conclusões dos autores foram:

- a entrada de ar pela superfície livre não é essencialmente influenciada pela pré-aeração;
- o suprimento de ar ocasionado pela pré-aeração reduz conforme aumenta a vazão;
- observa-se presença de ar próximo ao fundo da calha, mesmo para as maiores vazões.

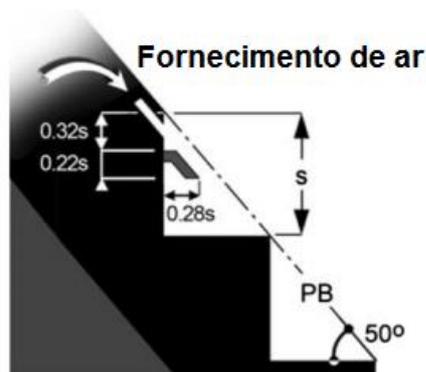


Figura 28 – Esquema do modelo utilizado por pfister et al. 2005. (fonte: Pfister et al, 2005)

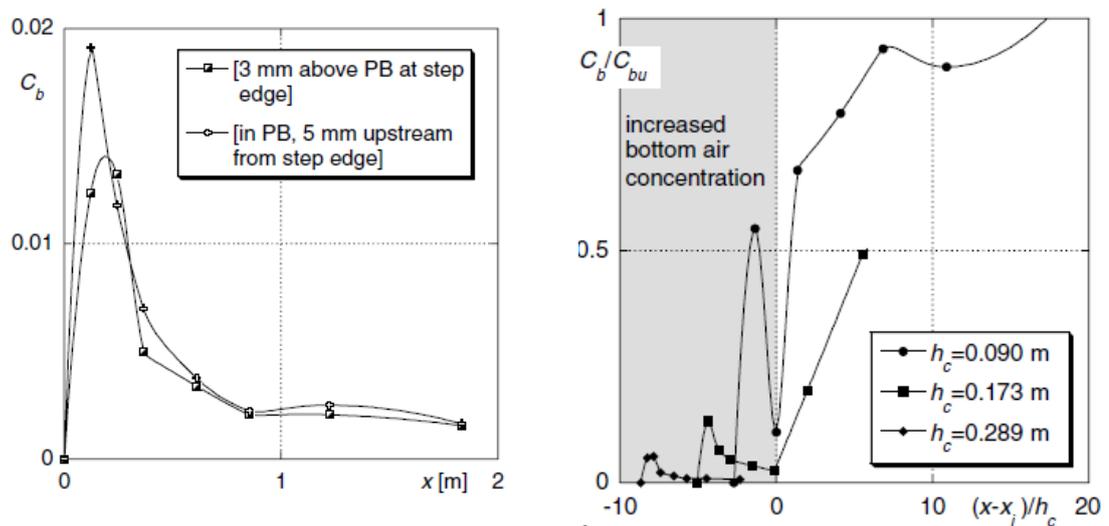


Figura 29 – Características da concentração de ar: (a) Concentração de ar ao longo de x medida a 3 e 5 mm do pseudo-fundo nas quinas dos degraus, (b) Concentração de ar relativa C_b/C_{bu} ao longo da calha.

Wang et al (2012) estudaram a implementação de aeradores do tipo pilares e defletor próximo à ogiva do vertedouro em degraus da Hidrelétrica Murum, localizada na Malásia. O objetivo do aerador é que a incorporação de ar ocorra através das cavidades formadas pela contração que o jato sofre ao escoar entre os pilares e pelo lançamento do jato pelo defletor (Figura 30). Os autores verificaram a concentração

de ar no escoamento na linha central da calha e no eixo entre os pilares e concluíram que a concentração de ar na calha em degraus com o aerador aumentou significativamente, o que pode evitar danos por cavitação.



Figura 30 – Modelo de vertedouro em degraus com aeração induzida estudado por Wang et al. (2012). (fonte: Wang et al., 2012)

Mojtaba et al. (2015) estudaram quatro diferentes tipos de defletores em conjunto com um aerador implantados em calhas em degraus (Figura 31) no início da calha. Algumas das conclusões obtidas pelos autores estão explicitadas abaixo:

- defletor tipo 1: para um defletor com dimensões constantes, o comprimento de início de aeração aumenta com a elevação da vazão e, para uma vazão constante, o comprimento de início de aeração decai conforme aumentam as dimensões do defletor;
- defletor tipo 2: o comprimento de aeração aumenta com o acréscimo nas dimensões do defletor. Também foi observada a incidência de forte contato do fluido com o defletor criando turbulência formando ondas irregulares na superfície do escoamento com o aumento do ângulo do defletor acima de 10° ;
- defletor tipo 3: este defletor não apresentou influência significativa na posição do ponto de início de aeração;
- defletor tipo 4: a presença do defletor reduz a largura do canal e produz ondas severas e oscilações no escoamento.

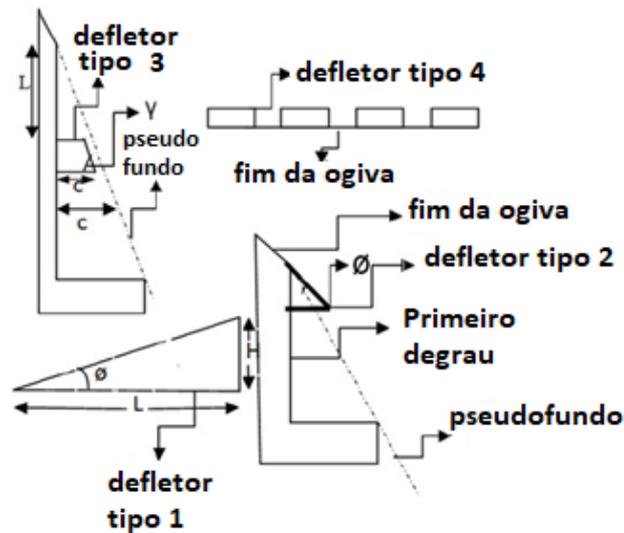


Figura 31 – defletores testados por Mojtaba et al. (2015). (fonte: adaptado de Mojtaba et al., 2015)

Além disso, Mojtaba et al. (2015) avaliaram o índice de cavitação com e sem a presença dos aeradores e concluíram que, para um canal com 40° de inclinação, a vazão escoada em vertedouros em degraus pôde ser ampliada em até 38,6% e, para uma calha com 51° de declividade, o aumento correspondente foi de 29,3%. Os autores consideraram, para essas conclusões, um índice de cavitação crítico igual a 0,2.

Terrier (2016) estudou diferentes geometrias e ângulos de um defletor em conjunto com aerador instalados no final da ogiva de um vertedouro em degraus. O autor realizou medições sobre o comportamento do escoamento, de concentração de ar nas seções transversais e também mediu a vazão de entrada de ar na tubulação responsável por conduzir o ar até o fundo da calha.

Quanto ao comprimento do jato (L_{jet}), o autor sugeriu a Equação 40 para o cálculo para os limites de seu trabalho ($30^\circ \leq \phi \leq 50^\circ$, $0,32 \leq h_d/h_o \leq 1,16$, $5,7 \leq \theta \leq 14^\circ$, $0,16 \leq t/h_o \leq 0,60$ e $3,2 \leq F_{ro} \leq 7,5$) e desde que não existam efeitos de subpressão. Segundo Pfister (2011) a subpressão deixa de influenciar no desenvolvimento do jato se tiver valores limitados a 10% da altura da lâmina d'água de aproximação (h_o).

$$\frac{L_{jet}}{h_o} = 0,5(1 + \text{sen}\Phi)^2(1 + \text{tan}\theta)^4 F_{ro}^{1,4} \left(\frac{t}{h_o}\right)^{0,4} \quad \text{Equação 40}$$

Onde: L_{jet} – Comprimento do jato lançado pelo defletor; h_o – profundidade de aproximação; Φ – declividade da calha; θ – declividade do defletor; F_{ro} – número de Froude rugoso; t – altura do defletor.

Terrier (2016) obteve em seus ensaios um comportamento um pouco diferente do demonstrado por Pfister et al. (2006a). Na Figura 32 é possível observar que existe

um núcleo de blackwater ao longo do jato que termina anteriormente ao impacto do jato ou devido ao impacto do jato, o que significa que, no momento em que atinge a calha, o escoamento é bifásico na totalidade da sua altura de lâmina de água.

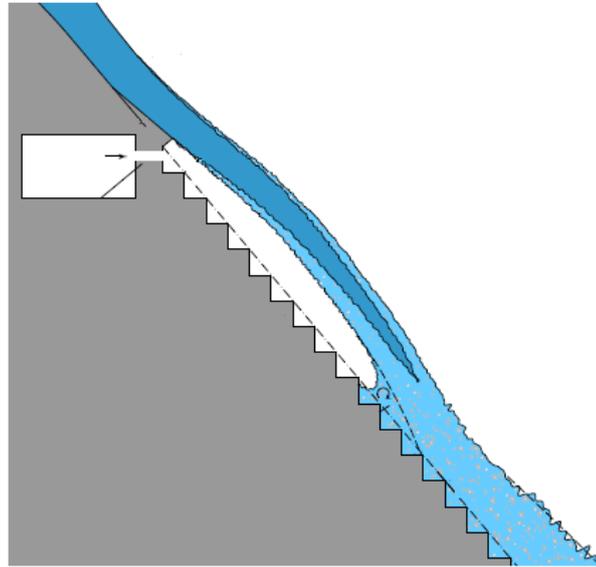


Figura 32 – comportamento do escoamento obtido por Terrier (2016) (fonte: adaptado de Terrier (2016)).

Através de medições de concentração de ar no fundo da calha, o autor concluiu que o desenvolvimento da concentração de ar no fundo (C_b) ocorre como demonstrado na Figura 33 (para vertedouros com duas diferentes inclinações, $\phi=30^\circ$ e $\phi=50^\circ$), onde foi constatada a ocorrência de pontos de máximo e de mínimo para quais foram propostas equações para estimativa. Além disso, Terrier (2016) avaliou a influência do número de Froude de aproximação e do ângulo do defletor na concentração de ar no fundo, concluindo que números de Froude maiores, assim como ângulos maiores de defletor significam maior concentração de ar no fundo do canal. Apesar disso, considerando todas as situações, a menor concentração de ar encontrada pelo autor foi de 0,09.

Terrier (2016) também comparou seus dados de concentração de ar no fundo da calha com os de Pfister (2006a), citados anteriormente, concluindo que seus ensaios mostraram concentrações de ar significativamente superiores aos do autor como mostra a Figura 34. Como explicação para essas diferenças, Terrier destacou as alturas de defletores utilizados (superior às utilizadas por Pfister (2006a)), os comprimentos dos jatos desenvolvidos (também superiores ao de Pfister (2006a)) e a subpressão na cavidade de ar, que não foi medida por Pfister (2006a).

Observando os padrões de escoamento de Pfister (2006a) e Terrier (2016), parece que o fato de o escoamento alcançar a calha já aerado, como é o caso dos escoamentos analisados por Terrier (2016), é, provavelmente, um motivo que explica o aumento da concentração de ar no fundo. Essa característica pode ser associada ao número de Froude do escoamento, ao comprimento do jato e altura do defletor, sendo, esses últimos, fatores destacados pelo próprio autor como possíveis motivos para as diferenças obtidas.

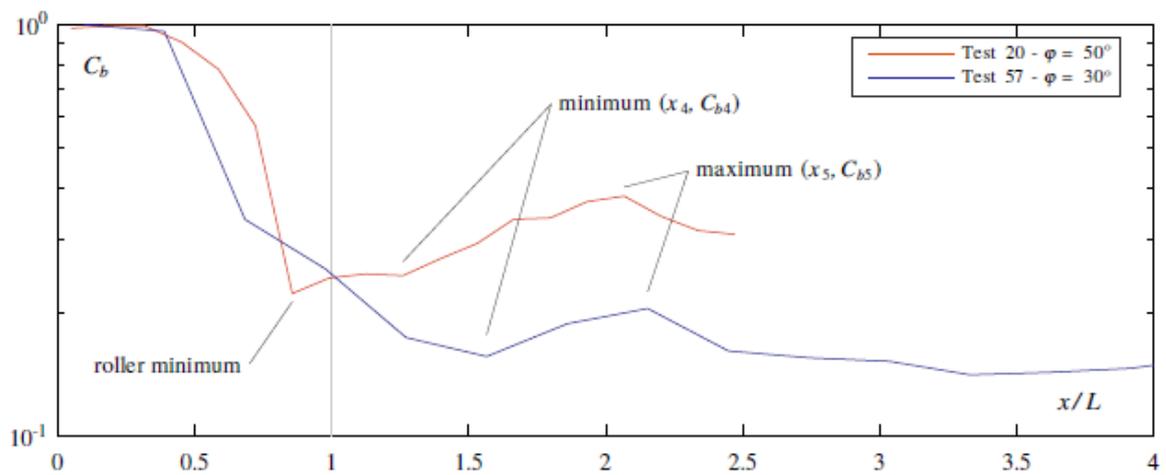


Figura 33 – Concentrações de ar no fundo do canal ao longo do calha obtidas por Terrier (2016) (fonte: TERRIER, 2016).

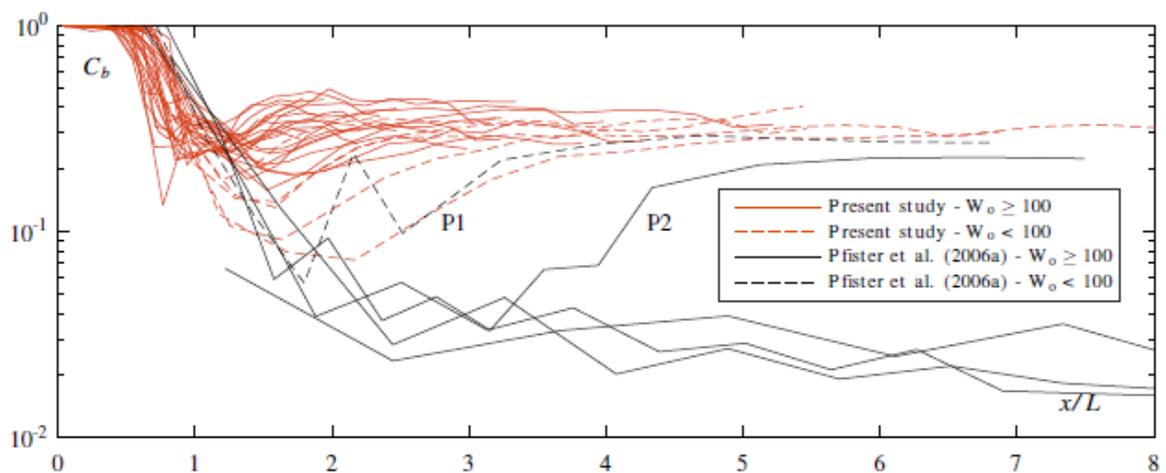


Figura 34 - Concentrações de ar no fundo do canal ao longo do calha obtidas por Terrier (2016) comparadas com Pfister (2006a) (fonte: TERRIER, 2016).

Novakoski et al. (2020) estudaram as características do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida através de defletor e câmara de ar localizados no primeiro degrau. A Figura 35 apresenta as zonas do escoamento definidas. Os autores verificaram que as posições em que as regiões ocorrem podem ser descritas por uma equação exponencial (Equação 41), cujos coeficientes a e b estão descritos na Tabela 8.

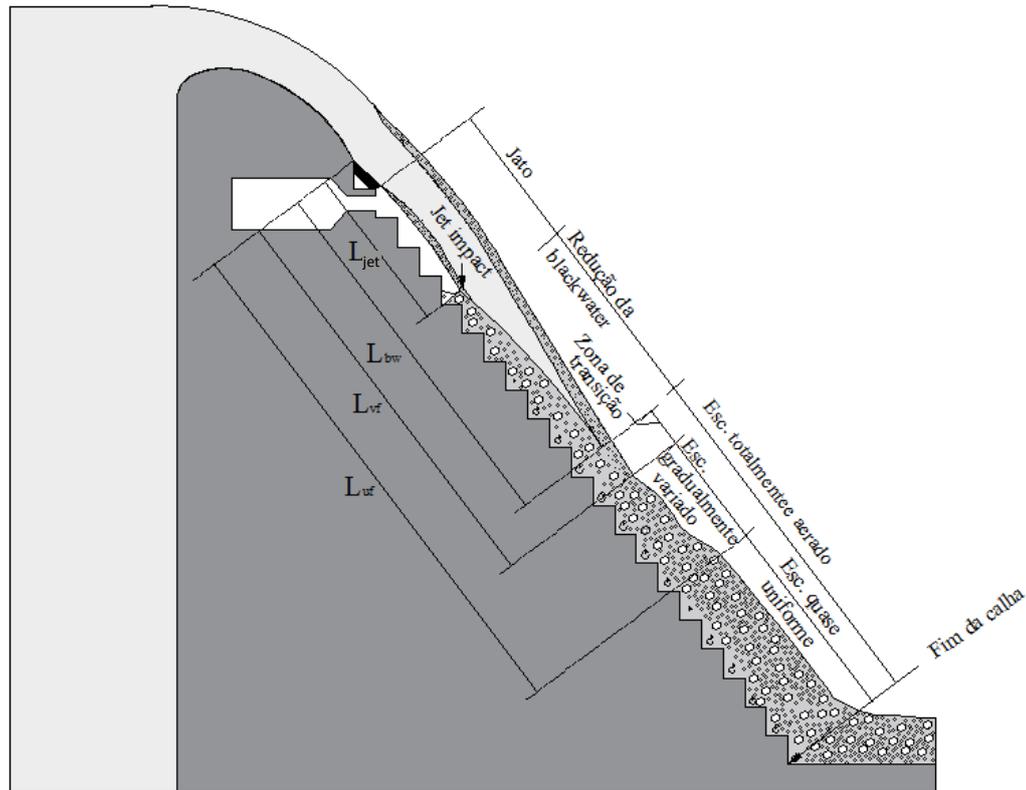


Figura 35 – Regiões do escoamento definidas por Novakoski et al. (2020) (fonte: adaptado de NOVAKOSKI et al.,2020).

$$F_r = a \left(\frac{L_{ref}}{h_o \sin \theta} \right)^b \quad \text{Equação 41}$$

Tabela 8 – Coeficientes a e b para Equação 41.

Characteristic position	Lref	a	b	R2
Impacto do jato	Ljet	0.89	0.367	0.97
Final da Blackwater	Lbw	0.73	0.40	0.85
Início da zona de escoamento gradualmente variado	Lvf	0.40	0.49	0.74
Início da zona de escoamento quase uniforme	Luf	0.40	0.47	0.99

Priebe (2020) estudou os esforços atuantes em uma calha em degraus com aeração induzida através de pilares em conjunto ou não com defletores (Figura 36). A autora verificou que as pressões apresentaram-se mais extremas em relação à situação equivalente em escoamento com aeração natural, o que não traz melhoras para reduzir o desenvolvimento da cavitação. Contudo, a autora também verificou, visualmente, a introdução de ar na parcela inferior do escoamento desde que este se encontra com os degraus. É possível que a concentração de ar proveniente da aeração induzida proteja a calha em degraus dos efeitos da cavitação, porém a autora

destaca que, para que essa afirmação seja comprovada, são necessários estudos de concentração de ar no escoamento.

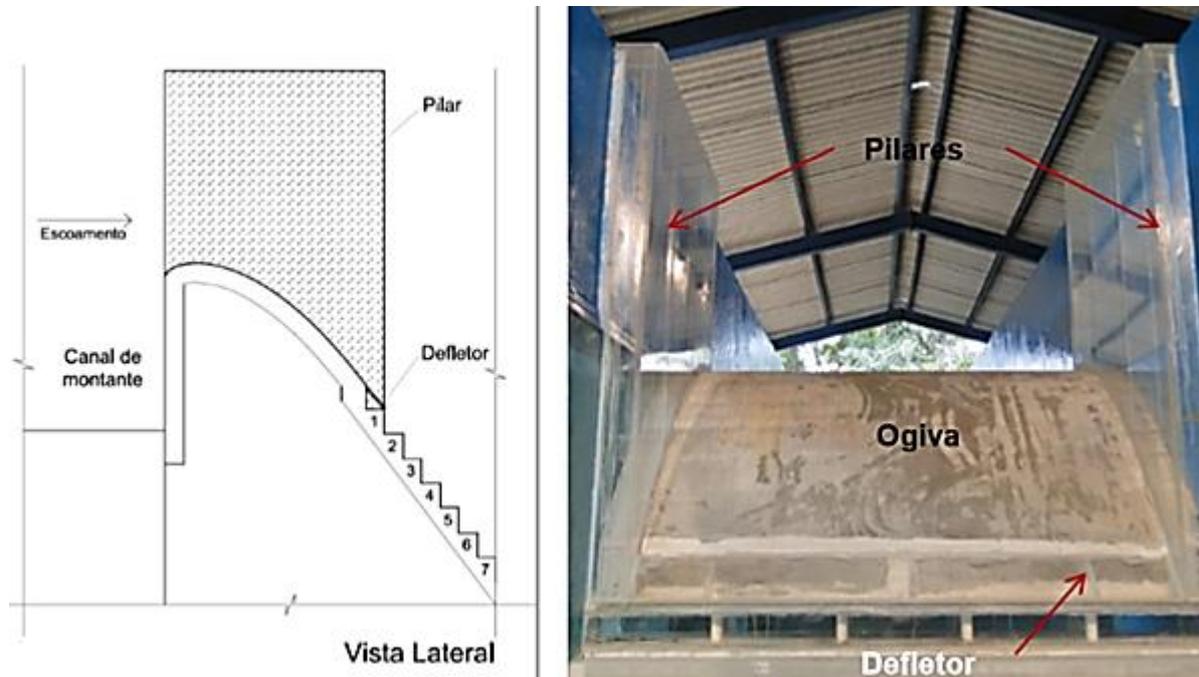


Figura 36 – Modelo de vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares utilizado por Priebe (2020) (fonte: PRIEBE, 2020)

Dong et al. (2019) estudaram concomitantemente as pressões na calha e a concentração de ar em um escoamento sobre vertedouros em degraus em conjunto com “X-shaped Flaring Gate Piers” (pilares em forma de X) como mostra a Figura 37. O trabalho dos autores se baseou em barragens em operação na China que, como relatado pelos autores, estão dimensionadas para vazões de cerca de 200 m/s/m, valor significativamente acima do existente na bibliografia como limite para danos por cavitação em vertedouros em degraus. O objetivo dos autores foi verificar a segurança de uma barragem desse tipo, baseando-se em dados de índice de cavitação e concentração de ar. Três casos foram ensaiados pelos autores através de simulação numérica, utilizando o Software Flow-3D. Os casos, 1, 2 e 3 possuem, respectivamente, vazões específicas de escoamento de 80, 120 e 166 m/s/m. Os resultados obtidos encontram-se resumidos na Figura 38, destacando-se que o índice crítico de cavitação utilizado pelos autores foi de 0,64, de acordo com Frizel e Renna (2013) e a concentração de ar necessária para que danos por cavitação sejam evitados foi de 7%, de acordo com Peterka (1953). Após a análise dos resultados, os autores concluíram que a concentração de ar oriunda da aeração induzida pelos pilares em forma de X apenas não foi suficiente para a proteção da barragem no caso

3, ou seja, com a maior vazão. Porém, os autores salientam que dentre as limitações do seu estudo está a falta de dados de concentração de ar em um modelo físico, o que teria permitido uma calibração mais adequada do modelo numérico.

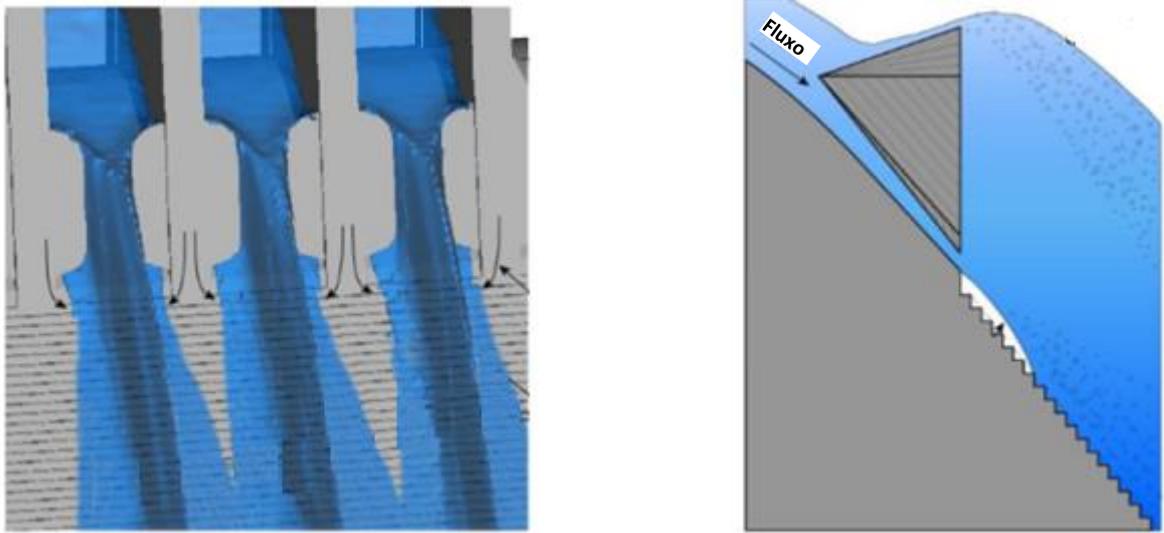


Figura 37 – escoamento sobre vertedouro em degraus em conjunto com pilares em forma de X (fonte: adaptado de Dong et al., 2019).

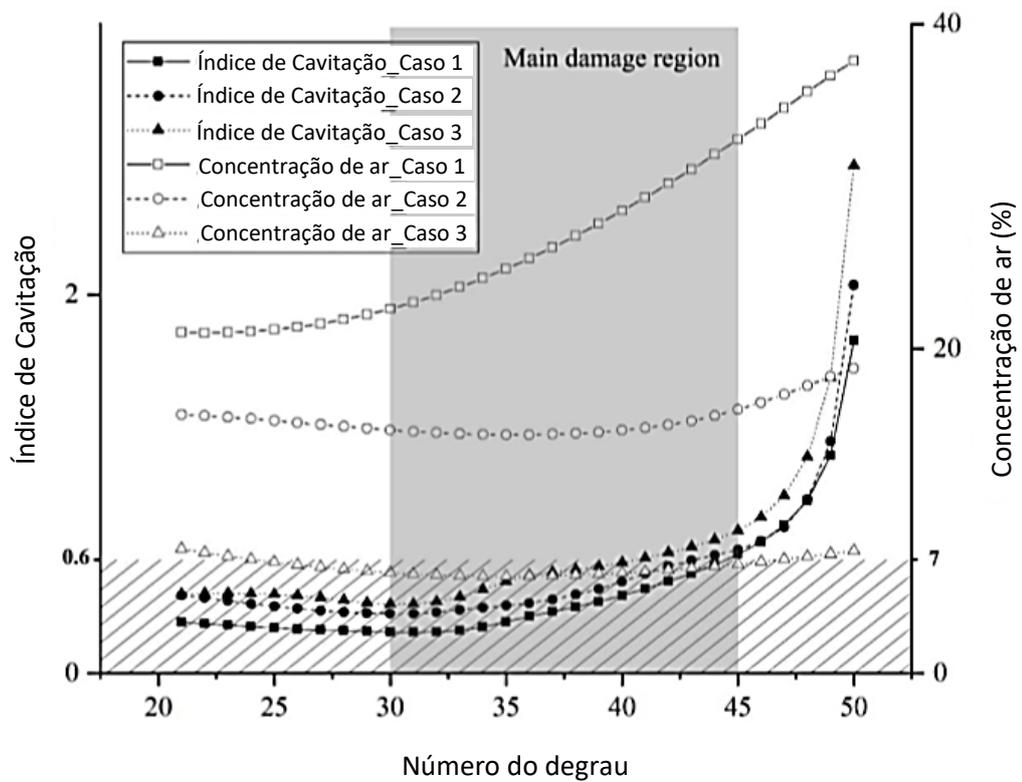


Figura 38 – Índice de cavitação e concentração de ar obtidos por Dong et al. (2019) para os três casos estudados pelos autores (fonte: adaptado de DONG et al., 2019)

Durante as análises do comportamento do escoamento com os diferentes tipos de aeradores utilizados pelos autores ao longo dos seus estudos, foi possível verificar diferenças no comportamento do escoamento, mesmo para situações que parecem semelhantes. A Figura 39 apresenta os comportamentos dos escoamentos verificados por Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) e Novakoski (2020), todas com aerador do tipo defletor. Pfister et al. (2006a) (Figura 39a) obtiveram um escoamento com desenvolvimento de núcleo de blackwater desde a formação do jato, que se estende a jusante do ponto onde o escoamento atinge os degraus da calha e que tem seu fim no local em que a aeração inferior encontra a aeração superior, essa última com início anterior ao ponto de início de aeração superior. No escoamento oriundo dos estudos de Terrier (2016) (Figura 39b), o núcleo de blackwater acaba a montante do ponto de impacto do jato, de forma que, ao atingir os degraus, o escoamento encontra-se totalmente aerado. Novakoski (2020) obteve um escoamento diferente dos demais, onde o núcleo de blackwater se estende no escoamento sobre os degraus, mas o ponto de início de aeração superior inicia mais a jusante, sendo observada, também, uma zona de transição. Possíveis fatores que podem justificar esse comportamento podem ser a geometria do defletor, a altura dos degraus da calha e o número de Froude do escoamento. Os defletores de Pfister (2006a) e Novakoski (2020) se encontram no final da ogiva, enquanto o modelo de Terrier (2016) utiliza uma Jetbox no início da calha, o que permite variar a altura da lâmina d'água h_0 e, assim, simular o defletor posicionado em diferentes posições na calha. Dessa forma, pode-se incluir o posicionamento do defletor na calha entre as características que podem influenciar no comportamento do escoamento com aeração induzida.

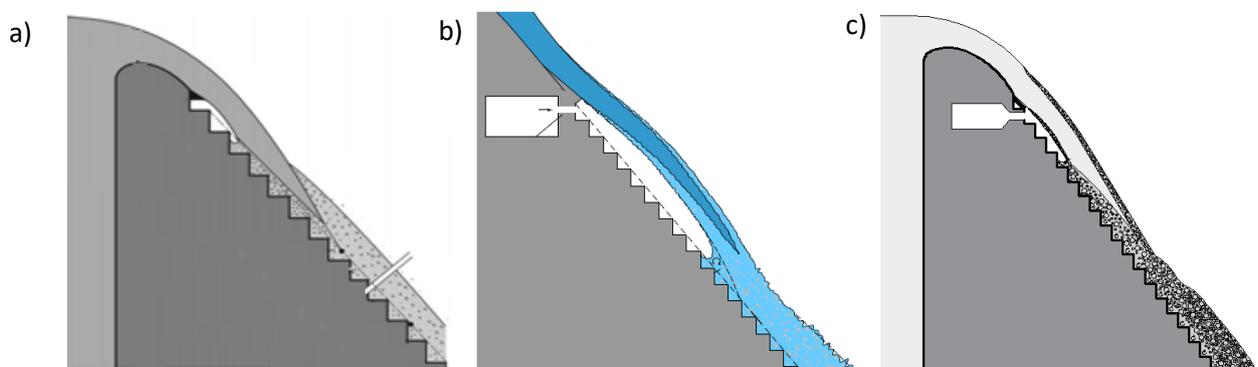


Figura 39 – Comportamento do escoamento segundo diferentes autores (fonte: adaptado de PFISTER, 2006a, TERRIER, 2016 e NOVAKOSKI, 2020).

Percebe-se que a maior parte dos estudos se concentra na análise da concentração de ar ao longo da calha e no comportamento do escoamento, o que se justifica pelo fato de que a presença de ar pode proteger a estrutura de concreto de efeitos de cavitação, como mencionado em 4.3. Porém, são poucos os estudos que consideram o campo de pressões, que, por sua vez, tem capacidade de indicar a possibilidade de ocorrência desse fenômeno bem como as zonas mais suscetíveis a danos. Acredita-se que estudos com análise conjunta de desenvolvimento de pressões em conjunto com concentrações de ar podem fornecer uma análise completa de proteção das estruturas escalonadas submetidas a escoamentos de altas velocidades.

5.6 DISSIPACÃO DE ENERGIA

Alguns estudos indicam que a entrada de ar no interior de escoamentos reduz o seu fator de resistência (f) e, portanto, reduz também a dissipação de energia ao longo da estrutura. Entre eles, pode-se citar Wood (1991), Chanson e Toombes (2002), Matos e Meireles (2014) e Rebollo et al (2019). Dessa forma, ao inserir ar artificialmente em vertedouros em degraus, no intuito de proteger o concreto contra danos por cavitação, se poderia estar alterando negativamente a dissipação de energia, uma das principais funções dessas estruturas. Entretanto, estudos como o de Pfister (2006b) e Zamora (2008) não encontraram diferenças significativas na dissipação de energia ao longo da calha de vertedouros em degraus com e sem a condição de aeração induzida.

Pfister et al. (2006b), no mesmo estudo apresentado nas Figura 28, concluíram que a pré-aeração não representou efeitos significantes na dissipação de energia ao longo da calha.

Zamora et al. (2008) estudaram um escoamento sobre vertedouro com elementos aerados como mostra a Figura 40. Analisando a dissipação de energia encontrada com diferentes vazões e comparando com os dados de Boes e Hager (2003), sem a presença de elementos aeradores, os autores concluíram que a dissipação de energia foi similar para ambas as situações, com e sem aeração induzida. Seus resultados estão apresentados na Figura 41, onde E_m é a energia de montante referente ao ponto em análise, E_r é a energia residual no pé do vertedouro, h_c é a altura crítica do escoamento e y é a distância vertical desde a crista até o ponto

em análise. Os autores também fornecem uma equação para o cálculo da dissipação de energia, apresentada na Figura 41 e na Equação 42.

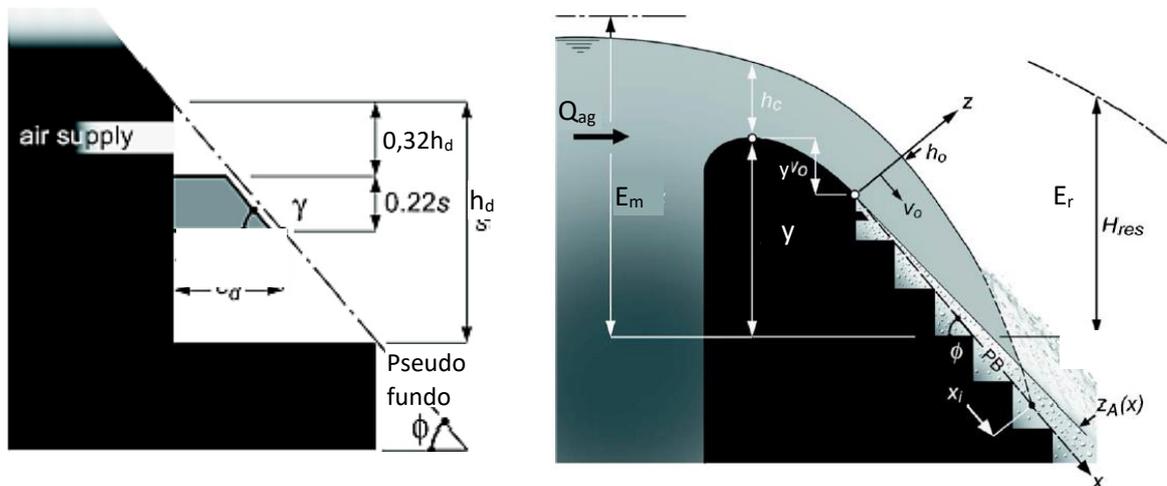


Figura 40 – esquema dos aerados utilizados no modelo de Zamora et al. (2008). (fonte: adaptado de Zamora et al. (2008))

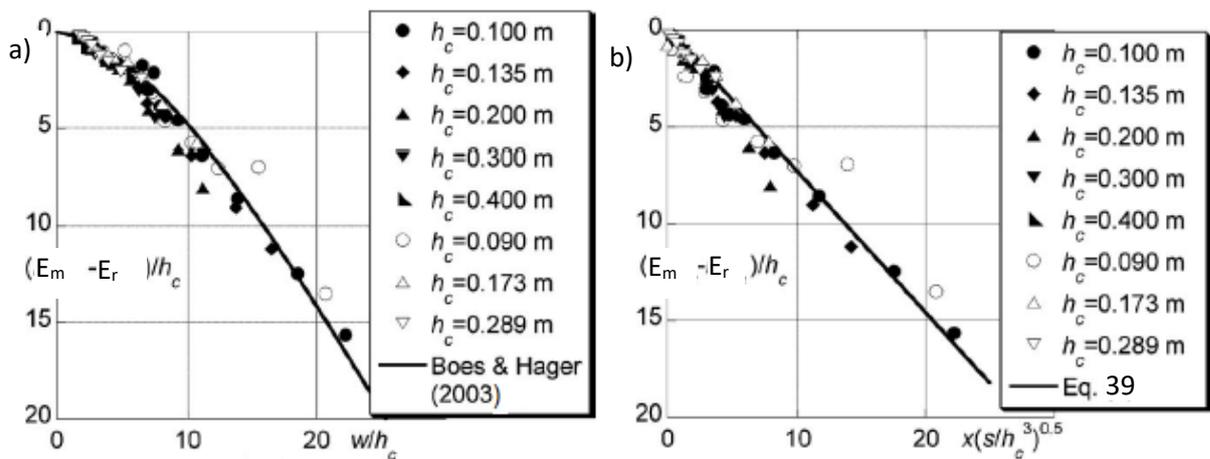


Figura 41 – Dissipação de energia para escoamento sobre vertedouro em degraus com e sem aeração induzida. (fonte: Zamora(2008)).

$$\frac{(E_m - E_r)}{h_c} = 0,73L \left(\frac{h_d}{h_c^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Equação 42

Onde: E_m =energia de montante (m); E_r =energia residual (m); h_c =profundidade crítica (m); h_d =altura do degrau (m).

Os autores explicam a não ocorrência de diferenças significativas na dissipação de energia em escoamento com e sem aeração induzida devido à entrada de ar proporcionada pelo dispositivo aerador não ser suficiente para reduzir o fator de resistência, o que vai ao encontro aos resultados de Wood (1991), que indica que o fator de resistência é significativamente alterado a partir de concentrações de ar a partir de 30%.

Wood (1991) apresenta dados de Straub e Anderson (1958) que relacionam o fator de resistência à concentração de ar do escoamento. A Figura 42 mostra os resultados onde f_e é o fator de resistência obtido para o escoamento aerado, f é o fator de resistência para o escoamento não aerado e C_b é a concentração de ar junto ao fundo da calha. Verifica-se que o valor do cociente f_e/f é praticamente constante até o ponto em que a concentração média de ar é de cerca de 30% e a concentração de ar junto ao fundo da calha é de 5%. Esse resultado indica que, para valores baixos de concentração de ar no escoamento, a dissipação de energia não deve ser significativamente alterada em relação a escoamentos monofásicos. Quando esses limites ($C < 30\%$ e $C_b < 5\%$) são excedidos, a dissipação de energia deve reduzir com o aumento da concentração de ar.

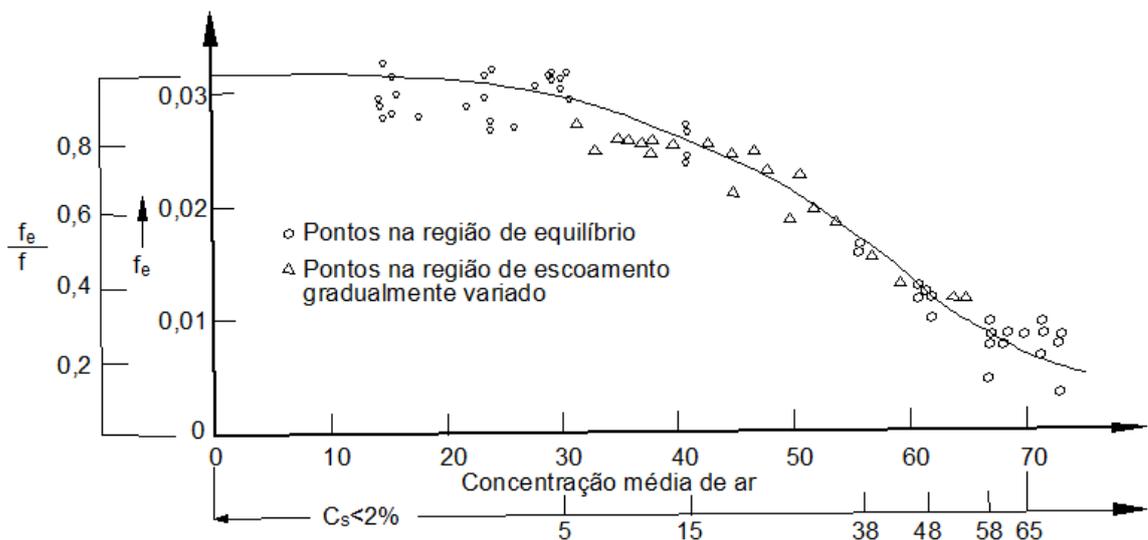


Figura 42 – coeficiente de resistência em função da concentração de ar em um escoamento. (fonte: adaptado de Wood (1991))

Arantes (2007) chegou a conclusões diferentes através de estudo por simulação numérica com escoamento com cerca de $11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (em valores de protótipo) em um vertedouro em degraus com aeração induzida através de câmara de ar. Seu trabalho indicou uma redução na dissipação de energia em uma calha em degraus submetida à aeração induzida em relação a uma calha em degraus submetida à aeração natural. A Figura 43 apresenta o modelo de aerador utilizado pelo autor. O perfil de velocidades avaliado em cada seção representada na Figura 43 e as linhas de energia específica em relação ao pé do vertedouro para as situações com e sem aeração induzida estão apresentadas na Figura 44, onde y é a altura na calha a partir da crista do vertedouro e E é a energia específica. Percebe-se que as velocidades são superiores para a situação com aeração induzida, o que indica que a dissipação de

energia é menor, fato que é corroborado observando-se a diferença entre as linhas de energia das duas situações na Figura 44. O autor destaca que as diferenças entre as linhas de energia para as situações com e sem aeração induzida aumenta com o comprimento da calha do vertedouro chegando a um valor 13% maior para a situação de escoamento pré-aerado devido à redução do fator de resistência pela incorporação de ar.

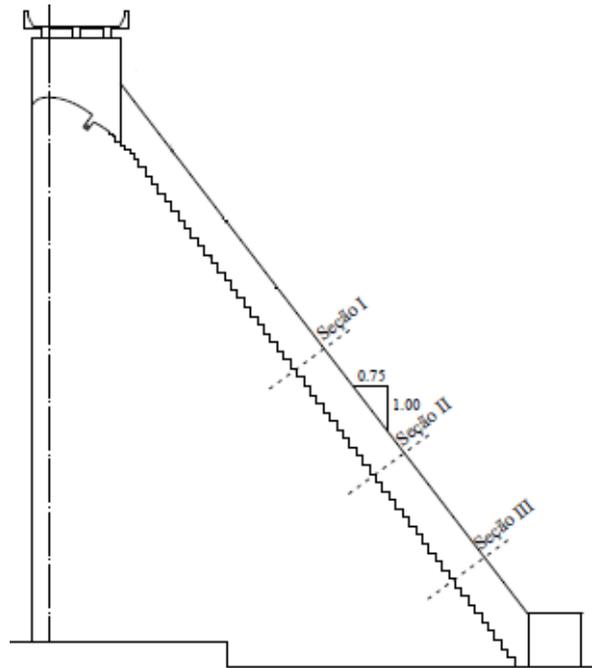


Figura 43 – Modelo numérico utilizado por Arantes (2007). (fonte: adaptado de Arantes (2007))

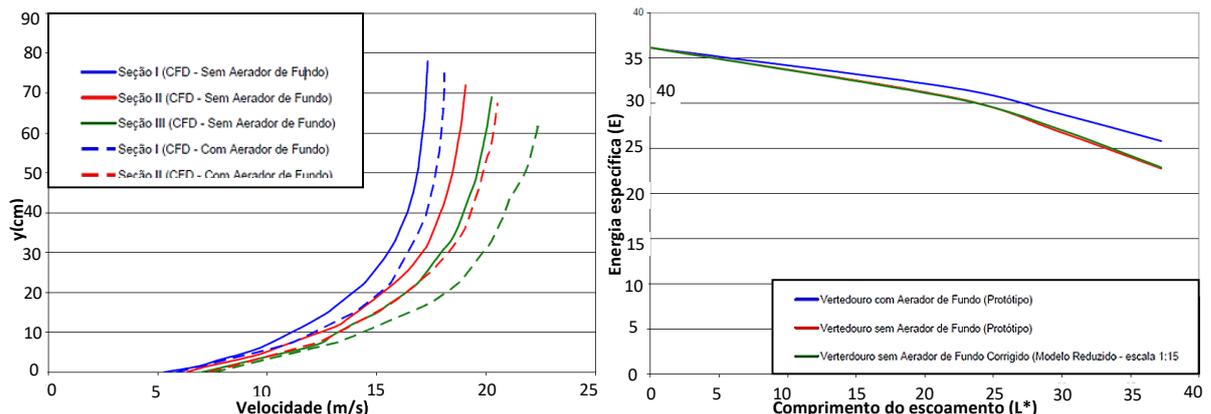


Figura 44 – Velocidades e energia específica do escoamento obtidas por Arantes (2007). (Fonte: adaptado de ARANTES, 2007).

Como os resultados de Arantes (2007) diferem dos de Pfster et al. (2006b) e Zamora et al. (2008), foi elaborada a Tabela 9 onde comparam-se as principais características dos modelos dos autores no intuito de auxiliar na identificação de possíveis motivos para a diferença entre seus resultados. A principal diferença entre

os estudos é o comprimento do vertedouro, que poderia ser a justificativa para a diferença de resultados, já que a Figura 44, de Arantes (2007), indica que a diferença entre a dissipação de energia cresce ao longo do comprimento da calha. Porém, espera-se que, a jusante da região em que o escoamento com aeração natural torna-se totalmente aerado, as concentrações de ar no escoamento com aeração natural ou com aeração induzida não mais sejam diferentes, o que significa uma estabilização na diferença entre a perda de energia para ambas as situações.

Ainda na tentativa de melhor compreender o contraste entre as pesquisas de Zamora et al. (2008), Pfister et al. (2006b) e Arantes (2007), os dados fornecidos por Arantes (2007) foram adimensionalizados conforme Zamora (2008) e plotados no mesmo gráfico, como mostra a Figura 45. Percebe-se que, apesar de ainda ser possível verificar diferenças entre a dissipação de energia na situação de aeração induzida em relação à aeração natural, os dados encontram-se próximos à dispersão dos dados de Zamora (2008) na região em que se encontram, embora se possa notar um distanciamento da reta referente à equação nos dados relativos à parte final da calha. Dessa forma, com essa análise não se pode descartar que a calha utilizada por Zamora (2008) e Pfister (2006b) não seja longa o suficiente para verificar a influência da aeração induzida na dissipação de energia.

Tabela 9 – Dados dos modelos de Pfister et al. (2006b), Zamora (2008), Boes e Hager (2003) e Arantes (2007)

Dados	Pfister et al. (2006b)	Zamora (2008) e Boes e Hager (2003)	Arantes (2007)
Declividade da calha	50°	50°	53°
Número de degraus	25	25	55
Altura do degrau em modelo	0,093 m	0,093 m	-
Altura do degrau em protótipo	1,20 / 0,30 m	1,20 / 0,30 m	0,50 m
Vazão máx em modelo	0,48 m ³ /s/m	0,90 m ³ /s/m	-
Vazão máx em protótipo	22,2 / 2,7 m ³ /s/m	41,7 / 5,2 m ³ /s/m	11,7 m ³ /s/m

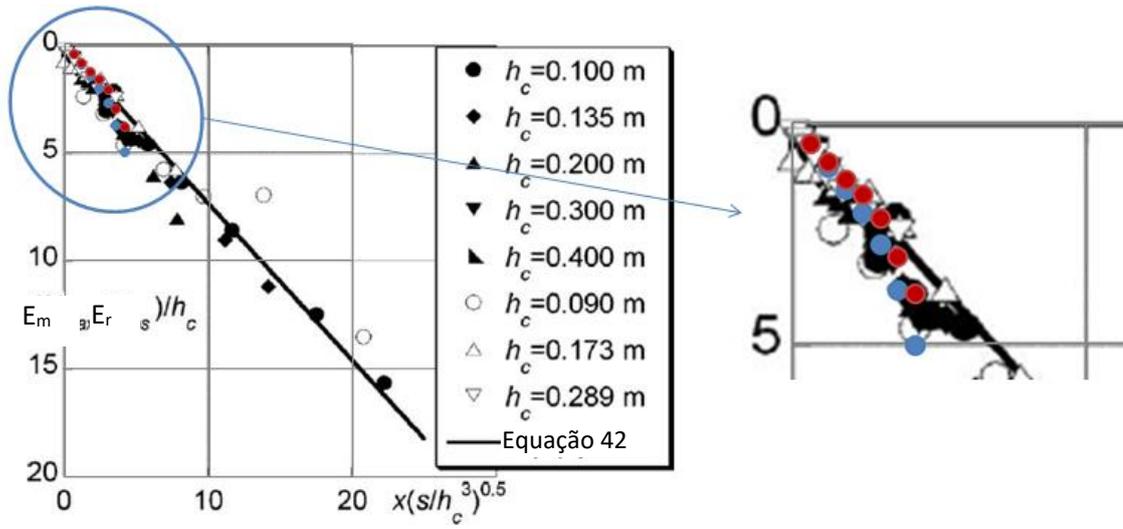


Figura 45 – Comparação entre os dados de dissipação de energia de Arantes (2007) e Zamora (2008).

6 EFEITOS DE ESCALA

Pfister e Hager (2010a) destacam que, para escoamentos à superfície livre, geralmente se utiliza o modelo de semelhança de Froude, contudo é impossível que um modelo de um escoamento bifásico (ar-água) seja geometricamente semelhante ao protótipo devido à turbulência interna, (número de Reynolds), ser subestimada, e os efeitos da tensão superficial, (número de Weber), serem superestimados. Para que uma similaridade dinâmica de escoamentos aerados fosse alcançada, seria necessário que os números de Froude, Weber e Reynolds fossem iguais em modelo e em protótipo, porém, utilizando-se o mesmo fluido em ambos, isso se torna impossível devido à tensão superficial e viscosidade do fluido não estarem devidamente escaladas. Sendo assim, nos estudos como Kobus (1984), Chanson (2009) e Pfister e Chanson (2014), a entrada e transporte de ar no modelo físico podem estar subestimados em relação ao protótipo. Contudo, é possível reduzir os efeitos de escala no que diz respeito a esses fatores limitando o número de Reynolds e de Weber do escoamento ensaiado. A Tabela 10 apresenta os limites especificados por diferentes autores para o estudo de diferentes parâmetros do escoamento. Os Números de Weber e de Reynolds podem ser calculados através da Equação 43, da Equação 44 e da Equação 45.

Segundo Pinto⁹ (1984 apud TERRIER, 2016), Pan e Shao¹⁰ (1984 apud Terrier, 2016), Borsari (1989) e Boes (2000 apud Terrier, 2016) para que possam ser desconsiderados os efeitos de escala relativos à aeração induzida, devido aos efeitos viscosos, à turbulência e à rugosidade do modelo, deve-se construir modelos físicos em escala geométrica de 1:10 a 1:20.

Pegram et al. (1999) avaliaram o efeito de escala através de medições da altura conjugada lenta de um ressalto hidráulico formado a jusante de uma calha em degraus. Os autores concluíram que modelos em escala igual ou superior a 1:20 representam adequadamente o comportamento do escoamento dessas estruturas.

Teixeira (2008) estudou o efeito de escala no comportamento das pressões médias no fundo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico e concluiu que

⁹ Pinto, N., L. Model evaluation of aerators in shooting flow. In Kobus, H., editor, *Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, 4.2, 1-6, Esslingen am Neckar, Germany. 1984.

¹⁰ PAN, S. e SHAO, Y. Scale effects in modelling air demand by a ramp slot. In Kobus, H., editor, *Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, 4.7, 1-4, Esslingen am Neckar, Germany. 1984.

existe uma tendência de que as pressões médias nos modelos sejam superiores às equivalentes em protótipo devido à possível redução da aeração nos modelos. Através de análise de dispersão de valores de pressão média, o autor sugeriu que, a fim de evitar efeitos de escala nas pressões médias medidas em modelo, deve-se utilizar escalas superiores a 1:20 (ou seja com modelos físicos de maior dimensão) para escoamentos com valores de número de Froude calculado no início do ressalto hidráulico multiplicado pela submergência do ressalto ($F_{rr}.S$) maior que 10.

Tabela 10 – Números de Reynolds e Weber limites para evitar significantes efeitos de escala em modelos físicos de acordo com diferentes autores. (fonte: adaptado de PFISTER e HAGER, 2010a e PFISTER e CHANSON, 2014, TERRIER, 2016)

Autor	Limitação	L_{ref}	Aplicação
Pan e Shao (1948 apud Terrier, 2016)	$Re > 3,5 \times 10^6$	L_{jet}	Aeradores, particularmente β
Kobus (1984)	$Re > 1 \times 10^5$	h_o	Entrada local de ar
Pinto (1984 apud Terrier, 2016)	$We > 500$	L_{jet}	Aeradores, particularmente β
Koschitzky (1984)	$Re > 1 \times 10^5$	h_o	Aeradores, particularmente β
Rutschmann (1988)	$We > 110$	h_o	Aeradores, particularmente β
Skipalle ¹¹ (1994 apud Terrier, 2016)	$We > 170$	h_o	Aeradores, particularmente β
Boes (2000 apud Terrier, 2016)	$We > 100$ $Re > 1 \times 10^5$	ΔL h_o	Escoamento bifásico em vertedouro em degraus Perfil de concentração de ar e de velocidade
Amador (2005)	$Re > 1 \times 10^5$	h	Campo de pressões na calha de um vertedouro em degraus.
Takahashi et al. (2005)	$Re > 4 \times 10^4$	h	Perfil da concentração de ar em vertedouros em degraus
Pfister (2008)	$Re > 2.2 \times 10^5$ $W_o > 140$	h_o	Aeradores, C_b em desenvolvimento
Chanson (2009)	$R > 5 \times 10^5$	h_c	Escoamento auto aerante

$$W_e = \frac{V_m}{\left(\sigma_w / \rho L_{ref}\right)^{0,5}} \quad \text{Equação 43}$$

$$R_e = \frac{v_m L_{ref}}{\nu} \quad \text{Equação 44}$$

$$R = \frac{\rho (gh_c^3)^{1/2}}{\mu} \quad \text{Equação 45}$$

Onde: Re =número de Reynolds; W_o =número de Weber; h_o =profundidade de aproximação (m); h_c =profundidade crítica do escoamento (m); L_{ref} =comprimento de referência (m); L_{jet} =Comprimento do jato (m); v_m =velocidade média (m); σ_w =tensão superficial do fluido (N/m); ρ =massa específica da água (kg/m³); ν =viscosidade cinemática da água (m²/s); μ =viscosidade dinâmica da água (N/m².s); R =número de Reynolds pela vazão unitária.

¹¹ Skripalle, J. Zwangsbelüftung von Hochgeschwindigkeitsströmungen an zurückspringenden Stufen im Wasserbau. Mitteilung 124. Technische Universität, Berlin, Germany. 1994.

7 METODOLOGIA

Para a realização dos ensaios, a presente pesquisa conta com três modelos físicos de vertedouro em degraus de diferentes características, dois deles instalados no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH – UFRGS – Rio Grande do Sul, denominados modelos LOH I e LOH II e outro instalado no Laboratório de Hidráulica experimental – LAHE – Furnas – Rio de Janeiro, denominado modelo LAHE, os mesmos modelos foram utilizados para os trabalhos de Priebe (2020) e Canellas (2020). Os três consistem em modelos de vertedouro em degraus com aeradores do tipo defletor em conjunto com um sistema de fornecimento de ar por uma câmara de ar. As principais características de cada um dos modelos se encontram na Figura 46, mais detalhes podem ser consultados no Apêndice A.

		
<p>LAHE: 20 degraus; Altura do degrau: 0,90 cm; Declividade: 1V:0,75H;</p>	<p>LOH I: 32 degraus; Altura do degrau: 0,60 cm; Declividade: 1V:0,75H;</p>	<p>LOH II: 62 degraus; Altura do degrau: 0,60 cm; Declividade: 1V:0,75H;</p>

Figura 46- Principais características dos três modelos físicos utilizados.

Os ensaios preliminares foram desenvolvidos nos modelos LAHE e LOH II, já os ensaios principais, nos modelos LOH I e LOH II. A necessidade dos ensaios preliminares ocorreu devido ao principal fenômeno medido (pressões desenvolvidas em um vertedouro em degraus com aeração induzida por defletores e câmara de ar) ser complexo e contar com um número reduzido de referências bibliográficas.

Os ensaios principais podem ser divididos basicamente em: 1) ensaios para avaliação da influência da aeração induzida nas características do escoamento ao longo da calha e 2) verificação da influência da aeração induzida na dissipação de energia ao longo da calha. Para ambos os casos também foram realizados ensaios

de referência com aeração natural, ou seja, sem a presença de elementos aeradores para comparação dos dados obtidos com escoamento com aeração induzida.

Nos ensaios realizados para o objetivo da verificação da influência da aeração induzida nas características do escoamento ao longo da calha em degraus, desenvolvidos no modelo LOH II, além das pressões junto às quinas dos degraus, foram medidas posições características do escoamento, o coeficiente de entrada de ar (β) e níveis de lâmina d'água do escoamento em diversos locais. Através da análise conjunta das grandezas medidas, foi estimada, teoricamente, a concentração de ar junto ao fundo da calha. As pressões desenvolvidas estão diretamente ligadas à formação e implosão das bolhas no processo de cavitação e a concentração de ar à proteção da estrutura no caso da ocorrência do fenômeno da cavitação. Dessa forma entende-se que a análise conjunta desses fenômenos possibilita uma verificação completa dos riscos de danos por cavitação aos quais a estrutura está submetida.

Para a verificação da dissipação de energia ao longo da calha, foram utilizados os modelos LOH I e LOH II. Para isso, foi realizada a medição das pressões na bacia de dissipação a jusante da calha e da altura conjugada lenta do ressalto hidráulico no modelo LOH I e a medição de alturas de lâmina d'água no escoamento sobre a calha no modelo LOH II a fim de analisar o comportamento das pressões junto ao pé do vertedouro, calcular o comprimento do ressalto hidráulico e estimar a dissipação de energia ao longo da calha através de balanço de energia. Também foi realizada uma análise de efeito de escala de forma a verificar a transposição dos dados obtidos na presente pesquisa para escala de protótipo. A Figura 47 esquematiza a metodologia adotada para os ensaios principais na presente pesquisa.

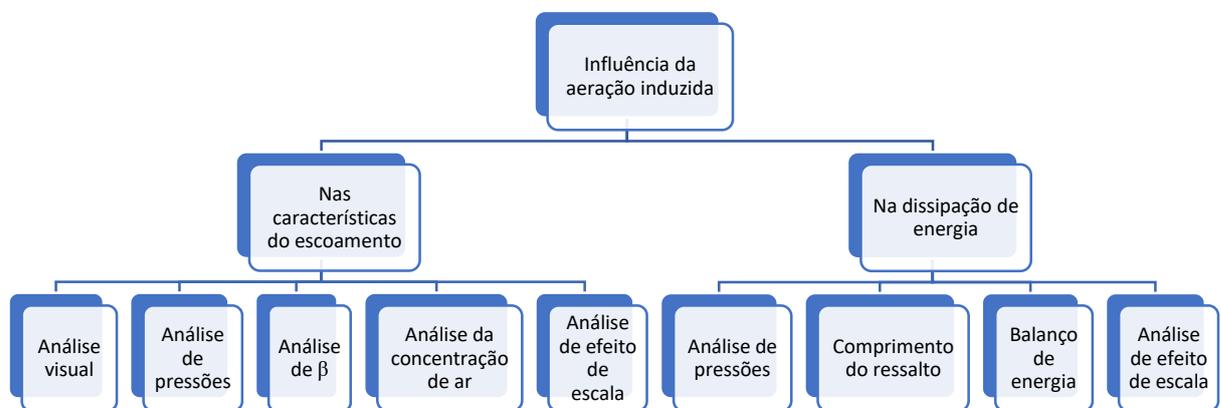


Figura 47 – Esquema da metodologia adotada.

7.1 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA NAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO AO LONGO DA CALHA EM DEGRAUS

A metodologia de ensaios e análise de dados realizada para a verificação da influência da aeração induzida ao longo da calha em degraus está descrita a seguir. Esses ensaios foram realizados no modelo LOH II. A aeração foi induzida no modelo através de um conjunto aerador composto por defletor e câmara de ar instalados na altura do primeiro degrau da calha (como mostra a Figura 48 e é detalhado no apêndice A). Foram utilizadas três diferentes geometrias de defletor, indicadas na Figura 49. As geometrias de defletores a serem estudadas foram determinadas através dos ensaios preliminares, realizados no modelo LAHE, cujos resultados encontram-se apresentados no Apêndice B.

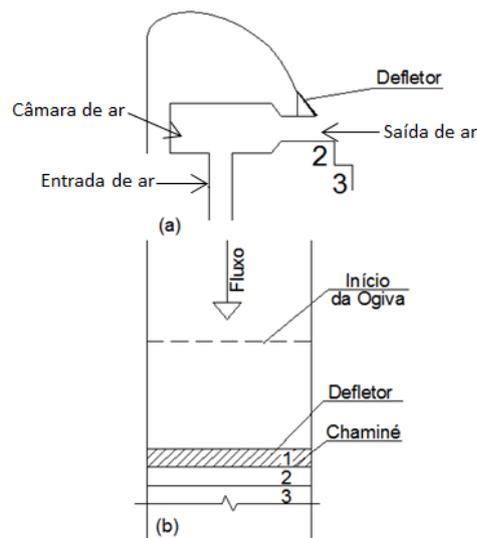


Figura 48 – esquema do sistema aerador no LOH II, (a) vista lateral e (b) vista frontal

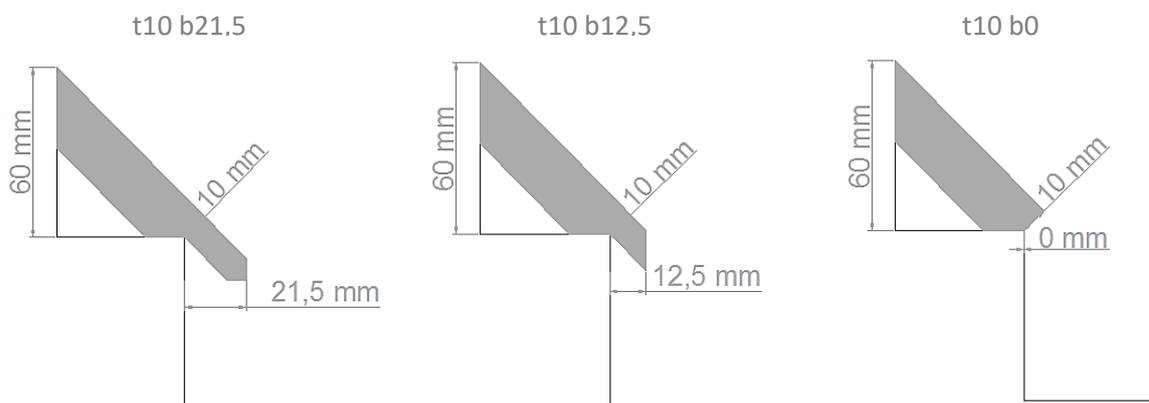


Figura 49 – Defletores utilizados para ensaios com aeração induzida no modelo LOH II.

7.1.1 ANÁLISE VISUAL DO ESCOAMENTO

Para cada situação de ensaio, foram feitas fotografias e vídeos do escoamento de forma a auxiliar na análise visual da aeração e no comportamento do escoamento. Os dados coletados através da análise visual das fotos, vídeos e no momento do ensaio são: ponto de impacto do jato proveniente do defletor (Figura 50a), ponto de início da aeração superior e ponto de início da aeração inferior (Figura 50b) e local de final da blackwater (Figura 50c). Destaca-se que o local de impacto do jato foi determinado em uma análise conjunta da análise visual e das pressões médias adquiridas nos patamares dos degraus.

Os dados foram coletados com o objetivo de verificar a influência da geometria do defletor na posição de ocorrência dos pontos citados anteriormente. Além disso, a aquisição desses dados visa possibilitar a caracterização do escoamento ao longo de calhas em degraus com aeração induzida, comparando-se com os trabalhos de Pfister (2006a), Terrier (2016) e de Novakoski et al. (2020).

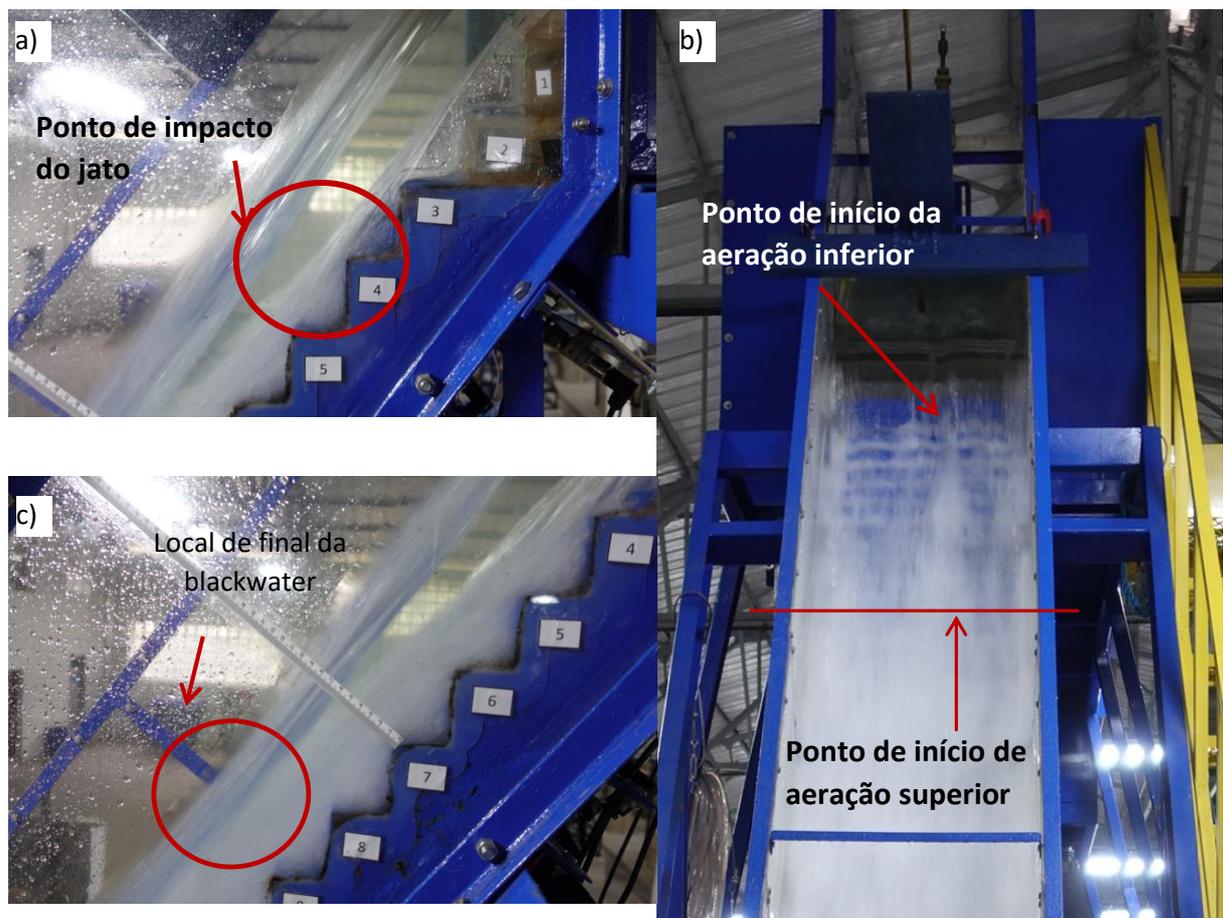


Figura 50 – Pontos característicos do escoamento: (a) ponto de impacto do jato; (b) Pontos de início intermitente da aeração superior e ponto de início de aeração superior e inferior e (c) Local onde as aerações superior e inferior se encontram.

7.1.2 DESENVOLVIMENTO DAS PRESSÕES AO LONGO DA CALHA EM DEGRAUS

Para a aquisição das pressões ao longo da calha em degraus, foram utilizados 56 transdutores de pressão piezoresistivos devidamente aferidos, o que corresponde a 28 degraus instrumentados ao longo da calha. Os transdutores, instalados próximo às arestas externas dos patamares e espelhos dos degraus, são das marcas Ômega (modelo PX419, série OM00 e erro de 0,08% F.E.), Sitron (modelo SP96, série S00 e erro de 0,5%) e Hytronic (modelo TM25, série H0 e erro de 0,25% F.E.). Os degraus onde foram instalados, a nomenclatura, a faixa de pressão dos transdutores utilizados e o detalhamento sobre a instalação estão no Apêndice C.

Os dados de pressão foram adquiridos simultaneamente para todos os transdutores por 10 minutos com frequência de 100 Hz. O tempo de ensaio foi determinado de acordo com ensaios preliminares descritos no Apêndice D, de acordo com a capacidade de frequência dos transdutores (100 Hz). A resposta dos transdutores de pressão também foi aferida a partir de resultados de ensaios com piezômetros. Esses ensaios estão apresentados no Apêndice E.

As pressões obtidas nas quinas dos degraus foram analisadas na sua forma dimensional (m.c.a.), o que permite a análise da influência da vazão e da geometria do defletor. As pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% também foram comparadas com as obtidas nos ensaios de referência com aeração natural, foram analisadas em valores de protótipo permitindo a verificação de pressões responsáveis pelo desenvolvimento do fenômeno da cavitação e adimensionalizadas através da Equação 46. A adimensionalização das pressões utilizada foi recomendada por Canellas et al. (2017).

$$\frac{P_{0,1\%}/\gamma}{Z} = f\left(\frac{L - L_{jete} + x}{h_o}\right) \quad \text{Equação 46}$$

Onde: $P_{0,1\%}/\gamma$ = carga de pressão com probabilidade de não excedência de 0,1% (m.c.a.); Z = energia no ponto analisado (m); L = distância ao longo da calha desde o final da ogiva até o ponto (m); L_{jete} = distância ao longo da calha desde o final da ogiva até o ponto de impacto do jato no espelho do degrau (m); x = parâmetro cujo valor é igual a 0 se $L \leq L_{jete}$ e L_{jete} se $L \geq L_{jet}$ (m).

7.1.3 ANÁLISE DA ENTRADA DE AR NA CÂMARA DE AR.

A determinação da vazão de ar foi feita através da medição de velocidade do ar na tubulação de entrada da câmara de ar medida através de um tubo de Pitot-Prandtl com transmissor de pressão (Figura 51) localizado na tubulação acoplada à câmara

de ar como indicado na Figura 52. A aquisição de dados teve a mesma duração e frequência da aquisição dos dados de pressão (duração de 10 minutos à frequência de 100 Hz). Diferentes equipamentos foram testados para a aquisição dos dados de entrada de ar na câmara. O Apêndice F apresenta esses estudos e também os realizados para a determinação do tempo de ensaio.



Figura 51 – Tubo de Pitot Prandtl com transmissor de pressão

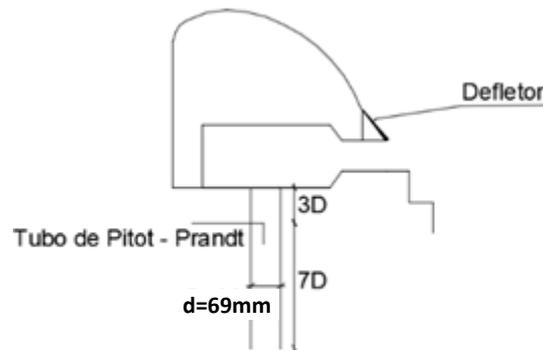


Figura 52 – Posição de medição do tubo de pitot prandtl na tubulação de entrada da câmara de ar.

A partir da velocidade de ar medida e das características da tubulação de entrada de ar, foi estimada a vazão de ar inserida ao escoamento através da Equação 47 e a demanda relativa de ar (β) foi calculada através da Equação 48.

$$Q_{ar} = \frac{\pi d^2}{4} \cdot v_m \quad \text{Equação 47}$$

$$\beta = \frac{Q_{ar}}{Q_{ag}} \quad \text{Equação 48}$$

Onde: d = diâmetro da tubulação; Q_{ar} = vazão de ar inserida ao escoamento; Q_{ag} = vazão do escoamento de água; v_m = velocidade média de entrada de ar medida; β = demanda relativa de ar;

As demandas relativas de ar calculadas para cada defletor testado foram comparadas de forma a verificar se a geometria do defletor influencia na quantidade de ar inserida ao escoamento. Além disso, os valores obtidos foram comparados com os mesmos dados oriundos dos trabalhos de Terrier (2016) de forma a verificar se as

equações propostas pelos autores (Equação 34 e Equação 36) podem ser utilizadas para as características da presente pesquisa.

7.1.4 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE AR JUNTO AOS DEGRAUS

A concentração de ar junto ao fundo da calha foi estimada com base nas medições de velocidade de ar na tubulação de entrada na câmara de ar, das pressões e dos níveis de lâmina d'água determinados através de fotografias e vídeos dos ensaios.

Foram utilizadas diferentes metodologias de acordo com as características de cada região do escoamento. A Figura 53 mostra as regiões presentes no escoamento com aeração induzida por defletor e câmara de ar localizados no degrau 1, segundo Novakoski et al. (2020). Na calha, ao longo do jato, sabe-se que a concentração média de ar é de 100% devido a não existir contato do escoamento com os degraus, sendo assim, para essa região, a concentração de ar não foi calculada. A partir do ponto de impacto do jato, até o final da blackwater (zona de redução da blackwater) foi utilizada a metodologia denominada relação $Q_{ar} \times h_{aer}$, explicada a seguir para a determinação da concentração de ar junto ao fundo diretamente. Na zona de escoamento totalmente aerado, foram utilizadas as metodologias relação $P \times h_{naer}$ e relação $h_{aer} \times h_{naer}$ para determinação da concentração média de ar e o modelo teórico experimental de Wood (1984 apud Matos, 1999) adaptado por Matos (1999) explicado no item 3.5, para determinar a concentração de ar no fundo.

Depois de estimada a concentração de ar junto ao fundo do canal, foi realizada uma análise juntamente com os valores de pressões extremas com 0,1% de probabilidade de não excedência de forma a verificar, conjuntamente, regiões propensas ao desenvolvimento do fenômeno da cavitação e proteção ao concreto proporcionada devido à concentração de ar.

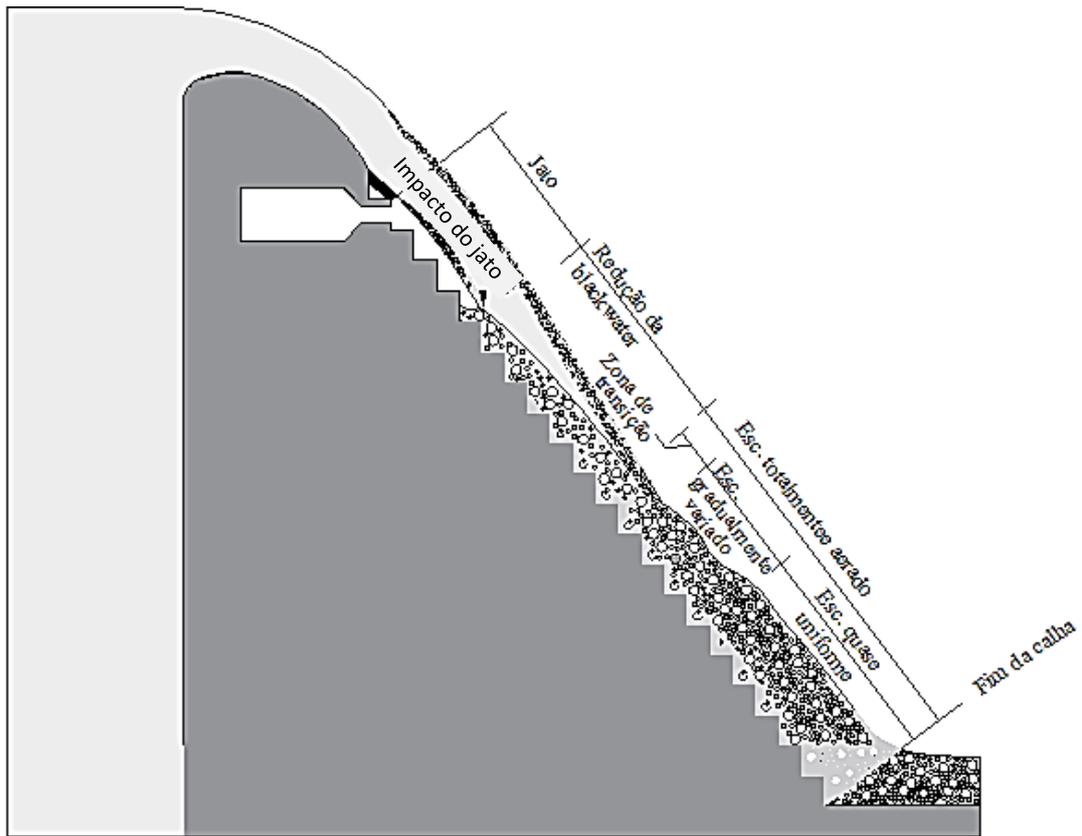


Figura 53 – Zonas do escoamento com aeração induzida com defletor e câmara de ar posicionados no degrau 1.

7.1.4.1 Relação $Q_{ar} \times h_{aer}$

Essa metodologia consiste em considerar que toda a vazão de ar que entra pela câmara de ar se distribui na porção inferior do escoamento no qual se visualiza uma separação bem definida entre a porção aerada e o núcleo de blackwater, como mostra a Figura 54. Essa consideração é justificada pelo fato de não haver trocas entre o ar que entra pela câmara e a superfície livre do escoamento, devido à porção aerada estar isolada da superfície livre pelo núcleo de blackwater. A Equação 49 foi utilizada para o cálculo da concentração de ar nessa região. Os parâmetros utilizados estão descritos na Figura 55 e o desenvolvimento da equação no apêndice G.

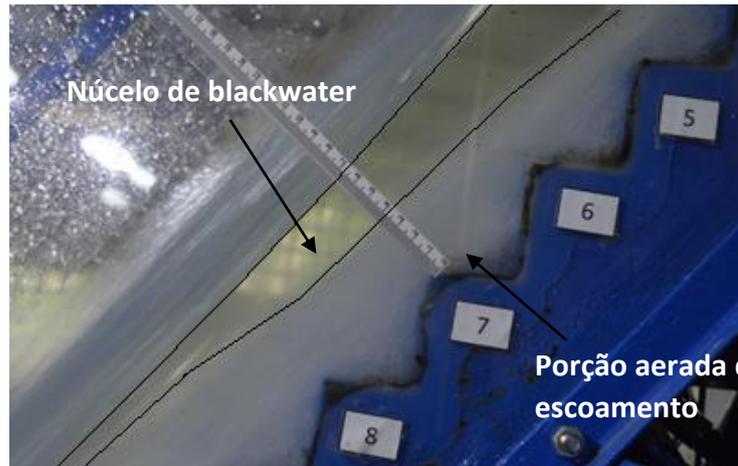


Figura 54 – Formação do núcleo de blackwater no escoamento.

$$C_{a,inf} = \frac{D}{h_{aer} \left(1 + \frac{Q_{ag}}{Q_{ar}}\right)}$$

Equação 49

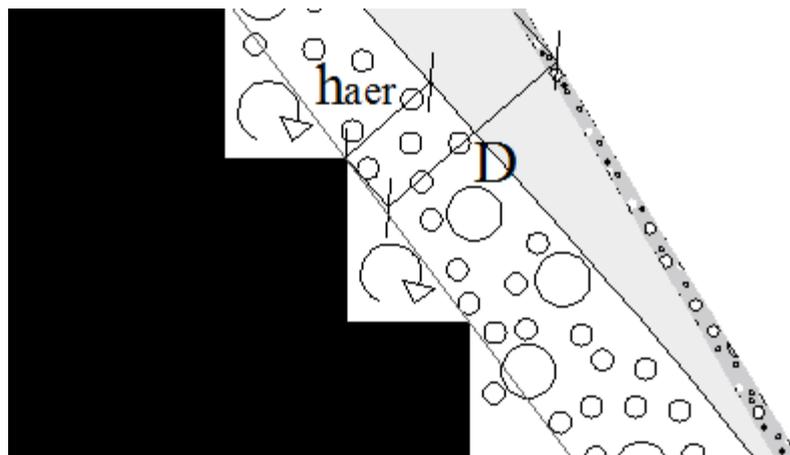


Figura 55 – Distribuição da concentração de ar no escoamento na zona de Blackwater

A concentração de ar resultante da aplicação desse método, apesar de fisicamente corresponder à concentração de ar média na porção aerada do escoamento, foi considerada como a concentração de ar no fundo devido a:

- Visualmente não ser possível identificar variação significativa de quantidade de bolhas ao longo da seção transversal da porção aerada de ar;
- Existindo variação na concentração de ar ao longo da seção transversal da porção aerada, essa é maior na parte inferior devido à entrada de ar ocorrer pelo fundo do canal, implicando em a média calculada corresponder a um resultado a favor da segurança.

7.1.4.2 Relação $P \times h_{naer}$

Esse método consiste em relacionar as pressões médias desenvolvidas nos patamares dos degraus da calha com a altura de água equivalente (h_{eq}) do escoamento. Para isso, é necessário que as pressões médias nos patamares dos degraus não apresentem variações significativas entre os escoamentos com aeração natural e com aeração induzida. Se relacionou as pressões medidas nas quinas dos patamares dos degraus na zona não aerada do escoamento em um vertedouro em degraus submetido à aeração natural com as alturas de água medidas através de fotografias e vídeos nos mesmos pontos. Essa relação foi feita para todas as vazões ensaiadas (0,054, 0,082, 0,108, 0,150, 0,200, 0,300, 0,400, 0,500 m³/s/m) nos degraus anteriores ao ponto de início de aeração. Para ajustar uma equação, os dados de pressão foram adimensionalizados pela altura do escoamento no final da ogiva e os dados de altura do escoamento pela rugosidade dos degraus. O ajuste dos pontos foi feito de forma a resultar em uma função potência como mostra a Equação 50. O desenvolvimento desse procedimento encontra-se no apêndice H.

$$\frac{h_{naer}}{k} = a \left(\frac{\frac{P_m}{\gamma} h_d}{h_c^2} \right)^b \quad \text{Equação 50}$$

Onde: h_{naer} = altura da lâmina d'água não aerada (m); k = coeficiente de rugosidade do degrau; P_m = pressão média (Pa); h_o = altura de água medida no final da soleira (m); a e b = coeficientes de ajuste da equação.

A partir da equação ajustada, conhecendo-se as pressões desenvolvidas na calha em degraus com aeração induzida, pode-se determinar a altura de água equivalente (h_{eq}) na zona aerada (que será igual à h_{naer} da equação 51) e calcular a concentração de ar através da Equação 51. A altura da lâmina d'água h_{90} foi medida através de fotos e vídeos como mostra a Figura 56. Segundo Matos (2000), a altura h_{90} pode ser representada, aproximadamente, pela superfície do escoamento verificada por análise visual pela lateral do canal.

$$C_a = 1 - \frac{h_{eq}}{h_{90}} \quad \text{Equação 51}$$

Onde: C_a = concentração média de ar; h_{eq} = altura de água equivalente na zona aerada (m); h_{90} = altura da lâmina d'água desde o pseudofundo até a altura em que o escoamento atinge concentração de ar de 90% (m).

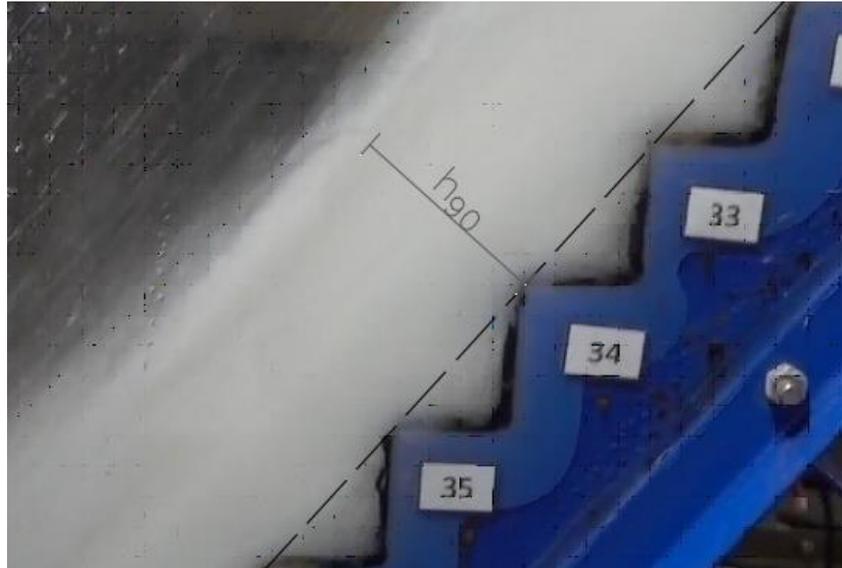


Figura 56 – Medida de h_{90} no escoamento.

7.1.4.3 Relação $H_{aer} \times h_{naer}$

Assim como o método anterior, esse método pode ser aplicado em regiões onde as pressões do escoamento com aeração natural e com aeração induzida não apresentem diferenças significativas. Sendo assim, nos trechos em que se obtém zona não aerada para o escoamento com aeração natural e zona aerada para o escoamento com aeração induzida, pode-se dizer que a diferença de altura entre os escoamentos se dá unicamente pela quantidade de ar presente no escoamento aerado. Então, para esses trechos, pode-se calcular a concentração de ar através da Equação 51, considerando-se como h_{eq} a altura da lâmina d'água não aerada no escoamento com aeração natural e como h_{90} a altura da lâmina d'água aerada no mesmo ponto, porém referente ao escoamento com aeração induzida (Figura 57). Essa metodologia foi aplicada para os trechos até o ponto de início de aeração referente ao escoamento com aeração natural.



Figura 57 – alturas do escoamento h_{90} na aeração induzida e h_{eq} na aeração natural para a vazão de 150 l/s.

7.2 VERIFICAÇÃO DA DISSIPACÃO DE ENERGIA AO LONGO DA CALHA EM DEGRAUS

Os ensaios para verificação da dissipação de energia em escoamento sobre calha em degraus com aeração induzida foram realizados no modelo LOH I e no modelo LOH II. No modelo LOH I, consistiram na aquisição de dados de pressão na bacia de dissipação a jusante da calha e nas medições de alturas características do escoamento e do ressalto hidráulico formado na bacia. Os defletores utilizados foram, além dos mesmos utilizados no modelo LOH II os indicados na Figura 58. No modelo LOH II, a avaliação da dissipação de energia foi realizada a partir dos dados de pressões desenvolvidas ao longo da calha, já adquiridos para as demais análises.

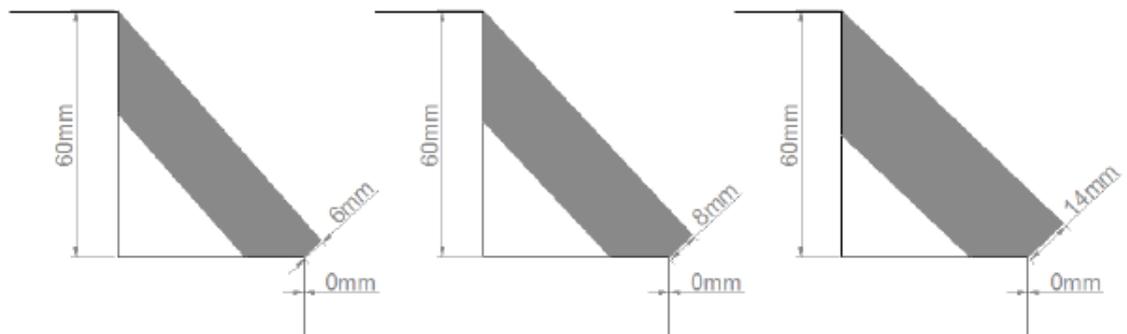


Figura 58 – Defletores utilizados no modelo LOH I além dos mesmos utilizados no modelo LOH II.

7.2.1 BALANÇO DE ENERGIA E COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO

As alturas de lâminas d'água do escoamento, no modelo LOH I, para cada situação ensaiada foram a altura conjugada lenta (y_2) e altura de montante (h_m). A altura da lâmina d'água na interseção da ogiva com a calha (h_o) foi calculada de acordo com a Equação 52. A altura conjugada lenta foi medida através de um tubo piezométrico instalado na parte final da bacia de dissipação juntamente com uma escala graduada. Destaca-se que foi verificado que o efeito do remanso após o término do ressalto hidráulico até a posição de medição de y_1 é desprezável. A lâmina d'água de montante foi medida através de uma ponta linimétrica. As medidas estão indicadas na Figura 59.

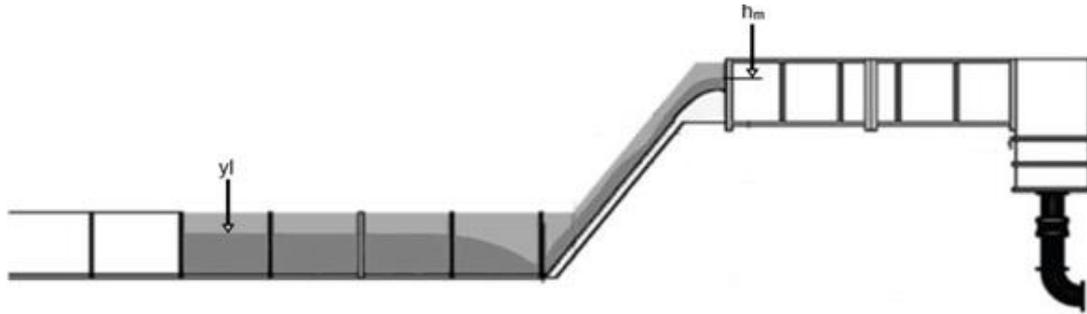


Figura 59 – Alturas de lâminas d'água medidas no modelo LOH I para análise da dissipação de energia.

$$h_o = h_c + \frac{v_c^2}{2g} + y_o - \frac{\left(\frac{q}{h_o}\right)^2}{\cos\Phi} \quad \text{Equação 52}$$

Onde: h_o = altura da lâmina d'água no final da ogiva; h_c = altura crítica do escoamento; v_c = velocidade do escoamento na posição da altura crítica; y_o = altura da ogiva; q = vazão específica do escoamento de água; g = aceleração da gravidade; Φ = declividade da calha.

Através das medidas de níveis d'água, foram calculados: energia de montante, energia residual no final da calha, energia na saída do ressalto hidráulico, energia dissipada no ressalto e energia dissipada na calha em degraus (Equação 53 à Equação 57). As Equação 53, Equação 54 e Equação 55, utilizam o coeficiente de Coriolis multiplicando a carga cinética. Segundo Chow (1959), os valores do coeficiente variam de 1,03 a 1,36 para canais prismáticos. O valor utilizado no presente trabalho foi de 1,1, o mesmo utilizado por Arantes (2007).

O comprimento do ressalto hidráulico também foi calculado através da Equação 58, proposta por Marques (1997) para o comprimento de um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro de calha lisa e cuja validade para ressalto a jusante de calhas em degraus foi verificada por Novakoski (2016). Para a aplicação das equações a altura conjugada rápida (y_r) foi calculada através da equação de Bélanger (Equação 59).

$$E_m = y_{calha} + y_o + h_m + \alpha \frac{v_m^2}{2g} \quad \text{Equação 53}$$

$$E_r = y_r + \alpha \frac{v_r^2}{2g} \quad \text{Equação 54}$$

$$E_l = y_l + \alpha \frac{v_l^2}{2g} \quad \text{Equação 55}$$

$$E_{dr} = E_l - E_r \quad \text{Equação 56}$$

$$E_{dc} = E_m - E_r \quad \text{Equação 57}$$

$$L_j = 8,5(y_l - y_r) \quad \text{Equação 58}$$

$$\frac{y_r}{y_l} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8F_{rl}^2} - 1 \right) \quad \text{Equação 59}$$

Onde: E_m = Energia de montante (m); y_{calha} = altura na calha (m); y_o = altura na ogiva (m); h_m = altura da lâmina d'água a montante da ogiva (m); α = coeficiente de coriolis (1.1); v_m = velocidade do escoamento na seção a montante da ogiva (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s²) ; E_r = energia residual (m); y_r = altura conjugada rápida (na entrada do ressalto) (m); v_r = velocidade do escoamento na entrada do ressalto (m/s); E_l = energia na saída do ressalto (m); y_l = altura conjugada lenta (na saída do ressalto) (m); v_l = velocidade do escoamento na saída do ressalto (m/s); E_{dr} = energia dissipada no ressalto (m); E_{dc} = energia dissipada na calha (m); L_j = Comprimento do ressalto hidráulico (m).

Os resultados foram adimensionalizados de acordo com a Equação 60 e plotados em função do número de Froude (Equação 61).

$$\frac{E_x}{H_t} \quad \text{Equação 60}$$

$$F_{ro} = \frac{v_o}{\sqrt{g \cdot h_o}} \quad \text{Equação 61}$$

Onde: E_x = Energia calculada (ou L_{jet}) (m); H_t = altura desde o pé do vertedouro até a lâmina d'água a montante da ogiva (m); F_{ro} = número de Froude no final da ogiva; v_o = velocidade do escoamento no final da ogiva (m/s); g = aceleração da gravidade (m²/s).

Como a Equação 62 também é utilizada para o cálculo da energia de montante, essa grandeza foi calculada também dessa forma para o modelo LOH I. Os resultados obtidos com as Equação 53 e Equação 62 podem ser observados no apêndice I, indicando que não há diferenças significativas nos resultados obtidos entre as duas formas de cálculo.

$$E_m = h_{calha} + h_{ogiva} + 1,5h_c \quad \text{Equação 62}$$

Onde: E_m = Energia de montante (m); h_{calha} = altura na calha (m); h_{ogiva} = altura na ogiva (m); h_c = altura crítica do escoamento (m).

Para avaliação da dissipação da energia no modelo LOH II, foram calculadas a energia de montante (Equação 62) e a energia residual no final da calha de acordo com a Equação 63. O valor de h_{eq} foi calculado pela Equação 83, apresentada no apêndice G. A energia dissipada na calha foi calculada pela Equação 57.

$$E_r = h_{eq} \cos \phi + \alpha \frac{v_e^2}{2g} \quad \text{Equação 63}$$

Onde: E_r = energia residual (m); h_{eq} = altura equivalente de água (m); ϕ = declividade da calha (°); α = coeficiente de Coriolis; v_e = velocidade do escoamento equivalente de água (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s²).

Os resultados de dissipação de energia obtidos para os dois modelos, com aeração induzida e natural, foram comparados entre si, em valores dimensionais, levando-se em consideração a vazão específica dos modelos e também foram comparados com os dados de Zamora (2008) e Boes e Hager (2003) utilizando-se a mesma adimensionalização proposta pelos autores.

$$\frac{E_m - E_r}{h_c} = f\left(\frac{y}{h_c}\right)$$

Equação 64

Onde: E_m = Energia de montante (m); E_r = energia residual (m); h_c = altura crítica (m); y = altura vertical desde a crista do vertedouro (m).

Como foram utilizadas diferentes formas de cálculo para avaliação da dissipação de energia nos modelos LOH I e LOH II, os resultados obtidos por ambos os métodos foram comprados para as situações de vazão específica dentro da mesma faixa. Os resultados encontram-se no apêndice J e indicam valores semelhantes independentemente da forma de cálculo.

7.2.2 ANÁLISE DE DADOS DE PRESSÃO NA BACIA DE DISSIPACÃO

A aquisição de dados de pressão no modelo LOH I foi feita na bacia de dissipação na tomada mais próxima da calha em degraus, como indicado por Novakoski et al. (2018), através de um transdutor de pressão da marca sitron, modelo SP96 com erro de 0,5% F.E. e faixa de aquisição de -0,15 a 0,3 m.c.a. O transdutor é conectado à tomada d'água faceado à superfície do piso da bacia de dissipação (Figura 60a) e é conectado à uma caixa de aquisição por corrente, que foi construída no laboratório, que, por sua vez, é conectada a um sistema de aquisição da marca National Instruments (Figura 60b). O sistema é conectado a um notebook onde os dados são adquiridos através do software LabView.

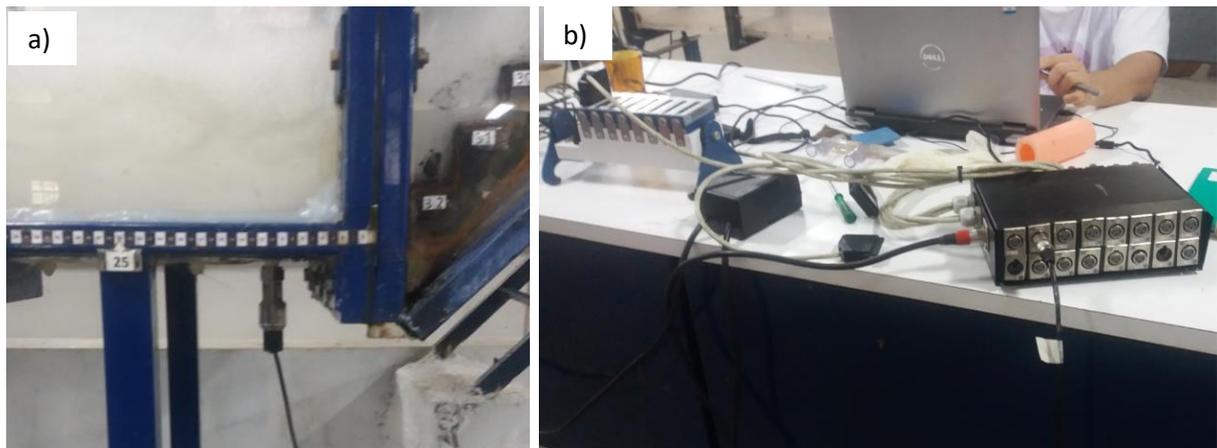


Figura 60 – Aquisição de dados de pressão, (a) instalação do transdutor na bacia de dissipação e (b) sistema de aquisição de dados.

O tempo de aquisição foi de 10 minutos com uma frequência de 100Hz, seguindo as recomendações de Teixeira (2008) para aquisição de dados de pressão em bacia de dissipação por ressalto hidráulico.

As pressões médias, calculadas através dos dados instantâneos coletados para cada situação ensaiada, foram comparadas de forma a verificar a influência da aeração induzida e da geometria do defletor nos resultados. Os dados de pressão foram adimensionalizados através da Equação 65 e plotados em função do número de Froude (Equação 61).

$$\frac{P_m}{\gamma H_t} = f(F_{ro})$$

Equação 65

Onde: $\frac{P_m}{\gamma}$ = carga de pressões médias (m.c.a.); H_t = nível do escoamento (altura da calha somada à altura da lâmina d'água); F_o = número de Froude do escoamento no final da ogiva; v_o = velocidade do escoamento no final da ogiva (m/s); g = aceleração da gravidade (m/s^2).

7.3 ANÁLISE DO EFEITO DE ESCALA NO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Para verificação de possíveis efeitos de escala, foram calculados os números de Froude, de Weber e de Reynolds do escoamento junto ao final da ogiva, conforme Equação 67 a Equação 69 para os modelos LOH I e LOH II.

$$F_{ro} = \frac{v_o}{\sqrt{g \cdot h_o}}$$

Equação 66

$$W_o = \frac{v_o}{\left(\sigma_w / \rho L_{ref}\right)^{0,5}} \quad \text{Equação 67}$$

$$R_o = \frac{V_o L_{ref}}{\nu} \quad \text{Equação 68}$$

$$R = \frac{\rho (g h_c^3)^{1/2}}{\mu} \quad \text{Equação 69}$$

Onde: F_{ro} =número de Froude no final da ogiva; R_o =número de Reynolds no final da ogiva; W_o =número de Weber no final da ogiva; h_o =profundidade do escoamento no final da ogiva (m); h_c =altura crítica do escoamento (m); g =aceleração da gravidade (m/s^2); L_{ref} =comprimento de referência (m); v_o =velocidade média no final da ogiva (m/s); σ_w =tensão superficial do fluido (N/m); ρ =massa específica da água (kg/m^3); ν =viscosidade cinemática da água (m^2/s); μ =viscosidade dinâmica da água ($N/m^2.s$); R =número de Reynolds modificado por Chanson (2009).

Para os casos em que $L_{ref} = h_o$, a altura da lâmina d'água (h_o) foi calculada através da Equação 70. A Figura 61 apresenta os parâmetros envolvidos. Para o caso em que $L_{ref} = L_{jet}$, foram utilizados os valores obtidos de acordo com as observações visuais e análise de pressões médias nos patamares. Para o caso em que o número de Reynolds é calculado com $L_{ref} = h$, a Equação 68 pode ser reescrita como $R = q/\nu$. Os valores calculados foram comparados com limites indicados na bibliografia para que os efeitos de escala possam ser desconsiderados.

$$h_o = 1,5h_c + y_o - \frac{\left(\frac{Q_{ag}}{0,5h_o}\right)^2}{2g} \quad \text{Equação 70}$$

Onde: h_o = profundidade (m); h_c = profundidade crítica (m); y_o = altura da ogiva (m); Q_{ag} = vazão do escoamento (m^3/s); g = aceleração da gravidade (m/s^2).

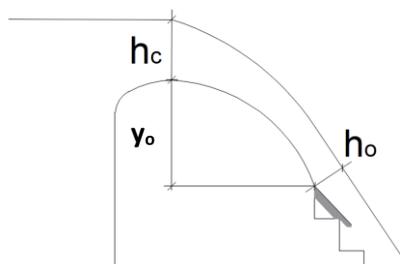


Figura 61 – Parâmetros utilizados para a Equação 70

8 RESULTADOS

O presente capítulo apresentará, separadamente, os resultados referentes à análise do efeito de escala, características do escoamento, pressões próximas às quinas dos degraus, estimativa da concentração de ar do escoamento e dissipação de energia. Para a sequência de discussão dos resultados obtidos, a Figura 62 indica os parâmetros utilizados.

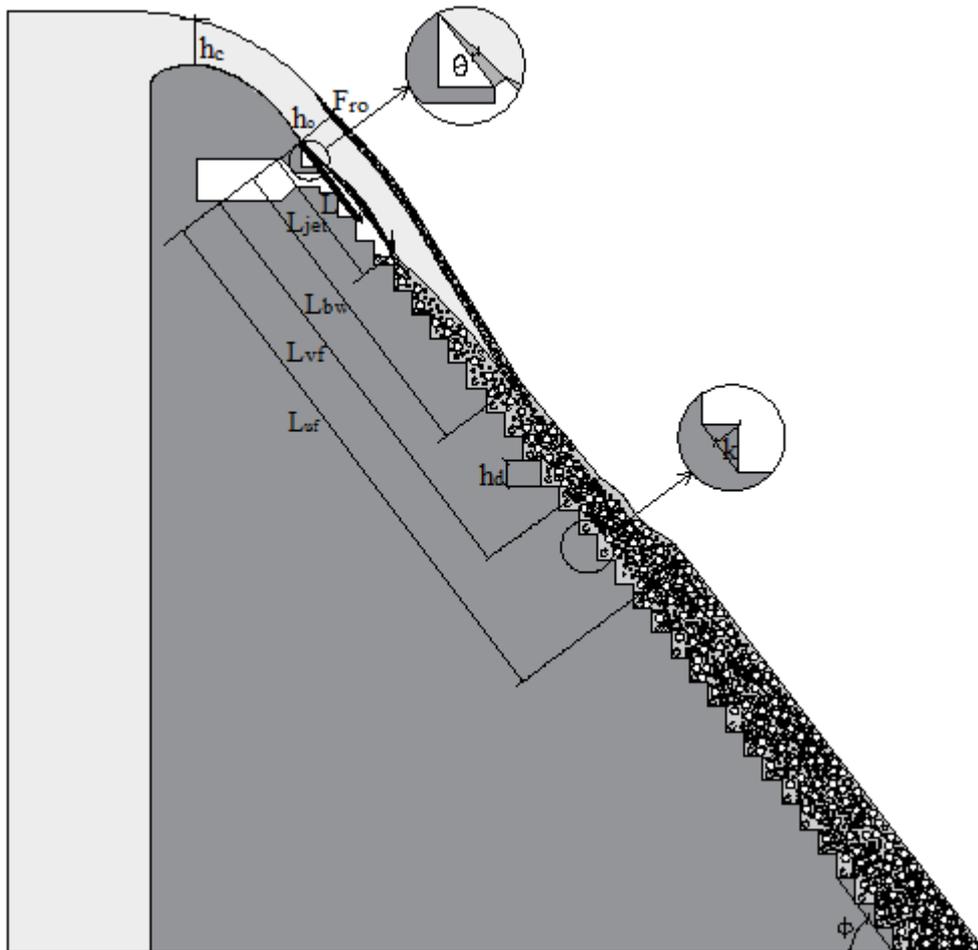


Figura 62 – Características do escoamento e simbologia dos parâmetros utilizados.

8.1 ANÁLISE DE EFEITO DE ESCALA

Os três modelos utilizados no presente estudo respeitam o modelo de semelhança de Froude. Foi feita uma análise de efeito de escala calculando-se além dos números de Froude, os números adimensionais de Weber e Reynolds para comparação com os limites sugeridos pela bibliografia para desconsideração dos

efeitos de escala. Os números de Froude, Reynolds e Weber foram calculados, para o modelo LOH I com $L_{ref} = h_o$ e para o modelo LOH II com $L_{ref} = h_o, L_{jet}$ e h como indicado na Equação 67 e na Equação 68. Para o modelo LAHE, os efeitos de escala não foram analisados devido a esse modelo ter sido utilizado apenas em ensaios preliminares com o objetivo de melhor compreensão dos fenômenos a serem estudados nos ensaios principais desenvolvidos nos modelos LOH I e LOH II.

8.1.1 Efeitos de escala no modelo LOH I

O modelo LOH I está sendo utilizado no presente trabalho em escala de 1:10, o que respeita as especificações de Pegram et al. (1999) para altura conjugada lenta e de Teixeira (2008) para pressões médias desenvolvidas no fundo de bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Além disso, foi feita análise do número de Reynolds de forma a comparar com o limite inferior sugerido por Kobus (1984). Esses resultados estão apresentados, numericamente na Tabela 11 e graficamente na Figura 63, nas quais se percebe que todos os pontos se encontram acima do limite inferior sugerido pelo autor, podendo-se concluir que os dados obtidos através do modelo não possuem influência de efeito de escala. As vazões em protótipo, equivalentes às vazões específicas ensaiadas no modelo estão apresentadas na Tabela 12.

Tabela 11 - Número de Froude e Reynolds (calculados com $L_{ref} = h_o$ para todos os ensaios realizado).

q (m ³ /s)	h _o (m)	v _o (m/s)	F _{ro}	R _e (h _o)
0,100	0,030	3,352	6,197	1,00 x 10 ⁵
0,125	0,037	3,410	5,587	1,25 x 10 ⁵
0,150	0,043	3,463	5,312	1,50 x 10 ⁵
0,200	0,056	3,559	4,795	2,00 x 10 ⁵
0,250	0,069	3,644	4,442	2,50 x 10 ⁵
0,275	0,075	3,683	4,304	2,75 x 10 ⁵
0,330	0,088	3,763	4,058	3,30 x 10 ⁵

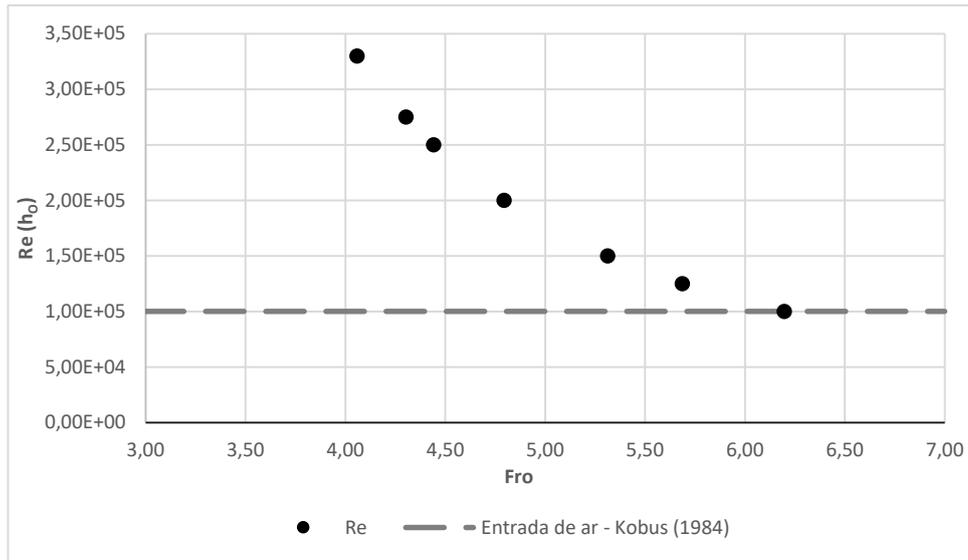


Figura 63 - Número adimensional de Reynolds do escoamento no modelo LOH I

Tabela 12 – vazões em modelo e protótipo para o modelo LOH I

Q _{modelo} (m ³ /s/m)	0,100	0,125	0,150	0,200	0,250	0,275	0,330
Q _{protótipo} (m ³ /s/m)	3,16	3,95	4,74	6,32	7,91	8,70	10,44

8.1.2 Efeitos de escala no modelo LOH II

Na Tabela 13 estão apresentados os números de Froude, de Reynolds e de Weber calculados com $L_{ref} = h_o$ e $L_{ref} = \Delta L$ e na Tabela 14 com $L_{ref} = L_{jet}$. No modelo LOH II, foram avaliados separadamente os possíveis efeitos de escala considerando-se a análise do coeficiente de entrada de ar (β), a estimativa da concentração de ar e a análise do campo de pressões na calha. A Figura 64 apresenta os números de Reynolds e Weber calculados com os diferentes L_{ref} em função do número de Froude e destacando os limites inferiores sugeridos por cada autor.

Tabela 13 – Número de Froude, Reynolds e Weber (calculados com $L_{ref} = h_o = L_{ref} = h$ para todos os ensaios realizados).

q (m ³ /s/m)	h _o (m)	V _o (m/s)	F _{ro}	Re (h _o) = Re(h)	We (h _o)	We (ΔL)
0,054	0,020	2,723	6,17	5,40 x 10 ⁴	45	87
0,082	0,029	2,816	5,27	8,20 x 10 ⁴	56	90
0,108	0,037	2,892	4,78	1,08 x 10 ⁵	65	92
0,150	0,050	2,996	4,28	1,50 x 10 ⁵	78	94
0,200	0,064	3,103	3,90	2,00 x 10 ⁵	92	97
0,300	0,091	3,282	3,47	3,00 x 10 ⁵	116	102
0,400	0,117	3,431	3,21	4,00 x 10 ⁵	137	106
0,500	0,140	3,563	3,04	5,00 x 10 ⁵	156	109

Tabela 14 - Números de Reynolds e Weber (calculados com $L_{ref} = L_{jet}$) para todos os ensaios realizados.

	q (m ³ /s/m)	L _{jet} (m)	Vo (m/s)	Re (L _{jet})	We (L _{jet})
Defletor t10 b0	0,054	0,525	2,723	1,43 x 10 ⁶	231
	0,082	0,525	2,816	1,27 x 10 ⁶	221
	0,108	0,525	2,892	1,30 x 10 ⁶	227
	0,150	0,45	2,996	1,35 x 10 ⁶	235
	0,200	0,45	3,103	1,40 x 10 ⁶	244
	0,300	0,375	3,282	1,23 x 10 ⁶	235
	0,400	0,300	3,431	1,29 x 10 ⁶	246
	0,500	0,300	3,563	1,07 x 10 ⁶	228
Defletor t10 b12,25	0,054	0,525	2,723	1,43 x 10 ⁶	231
	0,082	0,525	2,816	1,27 x 10 ⁶	221
	0,108	0,525	2,892	1,30 x 10 ⁶	227
	0,150	0,45	2,996	1,35 x 10 ⁶	235
	0,200	0,45	3,103	1,40 x 10 ⁶	244
	0,300	0,375	3,282	1,23 x 10 ⁶	235
	0,400	0,375	3,431	1,29 x 10 ⁶	246
	0,500	0,375	3,563	1,34 x 10 ⁶	255
Defletor t10 b21,5	0,054	0,675	2,723	1,84 x 10 ⁶	262
	0,082	0,675	2,816	1,90 x 10 ⁶	271
	0,108	0,675	2,892	1,95 x 10 ⁶	278
	0,150	0,600	2,996	2,02 x 10 ⁶	288
	0,200	0,600	3,103	1,86 x 10 ⁶	281
	0,300	0,600	3,282	1,97 x 10 ⁶	298
	0,400	0,525	3,431	2,06 x 10 ⁶	311
	0,500	0,525	3,563	1,87 x 10 ⁶	302

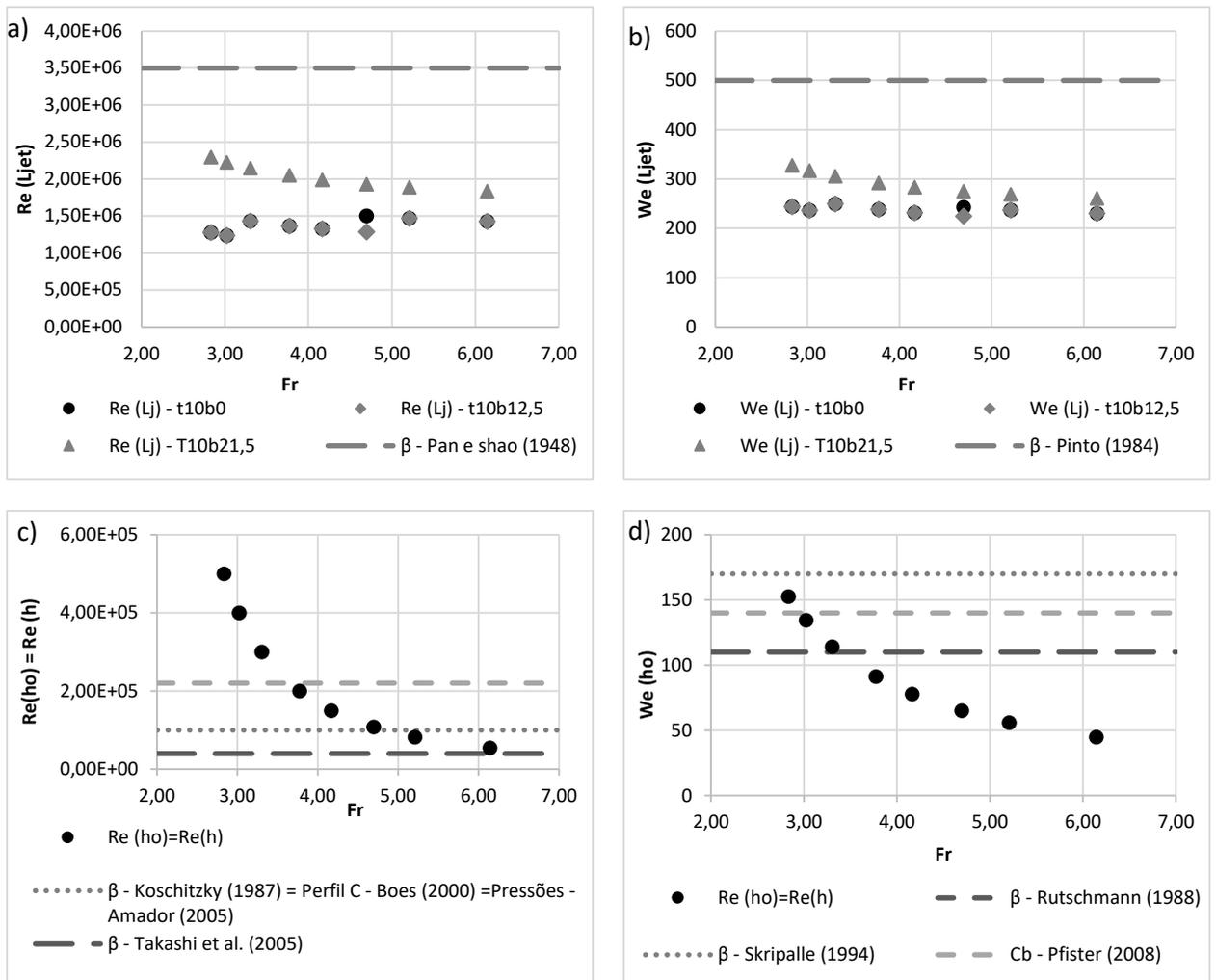


Figura 64 - Números adimensionais do escoamento no modelo LOH II, (a) $Re(L_{jet}) \times F_{ro}$, (b) $We(L_{jet}) \times F_{ro}$, (c) $Re(h_o)$, $We(h_o)$.

Tabela 15 – vazões em modelo e protótipo para o modelo LOH II

$Q_{\text{modelo}} \text{ (m}^3\text{/s/m)}$	0,054	0,082	0,108	0,15	0,200	0,300	0,400	0,500
$Q_{\text{protótipo}} \text{ (m}^3\text{/s/m)}$	3,1	4,8	6,3	8,7	11,6	17,4	23,2	29,0

Algumas conclusões da análise de efeito de escala são:

- Coeficiente de entrada de ar (β): Os números de Reynolds do escoamento com vazões específicas acima de 0,108 $\text{m}^3\text{/s/m}$ ($F_{ro}=4,78$) atendem às especificações de Koschitzki (1987) e os números de Weber dos escoamentos a partir da vazão específica de 0,3 ($F_{ro}=3,47$) atendem às exigências de Rutchmann (1988).
- Concentração de ar (C): Os números de Reynolds do escoamento com todas as vazões ensaiadas atendem às especificações de Takahashi et al. (2005) e os escoamentos com vazão específica a partir de

0,108 m³/s/m ($F_{ro}=4,78$) também atendem às especificações de Boes (2000 apud TERRIER, 2016) e os escoamentos com vazão específica igual ou superior a 0,3 m³/s/m ($F_{ro}=3,47$) ainda atendem à Pfister (2008). Em relação ao número de Weber, o escoamento de vazão específica de 0,5 ($F_{ro}=3,07$) atende às especificações desse último autor.

- Análise do campo de pressões na calha em degraus: Os escoamentos com vazões específicas a partir de 0,108 m³/s/m ($F_{ro}=4,78$) atendem às especificações de Amador (2005).

Pode-se concluir, então que as vazões maiores possuem menor probabilidade de estarem sujeitas à efeitos de escala, já que atendem às exigências de Koschitsky (1987), Rutchmann (1988), Boes (2000), Pfister (2008) e Takashi et al. (2005) para os parâmetros envolvidos, destacando-se que são as vazões mais importantes para o estudo já que são as que apresentam maior risco de danos por cavitação nas estruturas. Apesar de, segundo autores como Pinto (1984 apud TERRIER, 2016), Pan e Shao (1948 apud Pfister e Hager, 2010a) e Skripale (1994 apud Terrier, 2016), os escoamentos estudados não atingirem os valores de número de Reynolds e/ou Weber necessários para desconsideração dos efeitos de escala no estudo de β , é importante destacar que possíveis efeitos de escala à que podem estar submetidos os dados provenientes do presente estudo tendem a subestimar a quantidade de ar no escoamento. Portanto, os resultados, mesmo se submetidos à possíveis efeitos de escala, encontram-se a favor da segurança. Além disso, destaca-se que o presente trabalho considera o modelo LOH II em escala 1:15, de forma a atender as recomendações de Borsari (1989), Pinto (1984 apud TERRIER, 2016), Pan e Shao (1984 apud apud Pfister e Hager, 2010a), e Boes (2000 apud Terrier, 2016) para eliminação dos efeitos de escala em modelos com aeração induzida. Sendo assim, as vazões consideradas para protótipo, equivalentes às ensaiadas em modelo são expostas na Tabela 15.

8.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA NAS CARACTERÍSTICAS DO ESCOAMENTO

8.2.1 Análise visual das características do escoamento

A análise visual das características do escoamento foi feita através da identificação das posições características no escoamento com aeração induzida no

modelo LOH II e da comparação do início de aeração em relação ao escoamento com aeração natural.

8.2.1.1 Identificação das posições características

Através da observação dos ensaios realizados, como já indicado ao longo da metodologia, constatou-se que o escoamento apresentou comportamento semelhante ao indicado por Novakoski et al. (2020), demonstrado na Figura 53. A Figura 62 representa as características do escoamento observado juntamente com a simbologia utilizada para cada parâmetro. A Tabela 16 apresenta os pontos característicos do escoamento nos ensaios realizados no modelo LOH II com os defletores t10 b0, t10 b12,5 e t10 b21,5.

Tabela 16 – Pontos característicos do escoamento para todos os ensaios realizados, segundo análises visuais

	q (m ³ /s/m)	Degrau de impacto do jato	Degrau de início de aeração superior	Degrau de início de aeração inferior	Degrau final da blackwater
Defletor t10 b0	0,054	7	8	7	
	0,082	7	9	6	
	0,108	6	10	6	
	0,150	6	12	6	7
	0,200	6	16	6	10
	0,300	6	25	5	13
	0,400	5	33	5	16
	0,500	5	40	4	19
Defletor t10 b12,5	0,054	7	8	7	
	0,082	7	9	6	
	0,108	6	10	6	
	0,150	6	12	6	8
	0,200	6	16	6	10
	0,300	6	24	5	13
	0,400	5	32	5	16
	0,500	5	39	5	18
Defletor t10 b21,5	0,054	9	10	9	
	0,082	9	12	9	
	0,108	9	14	9	
	0,150	9	16	9	
	0,200	9	20	8	
	0,300	9	26	8	12
	0,400	9	36	8	16
	0,500	9	41	7	17

A Figura 65 mostra, graficamente, os resultados da tabela. O degrau de impacto do jato foi determinado através da análise visual e das pressões médias nos patamares, observando-se o maior pico de pressões.

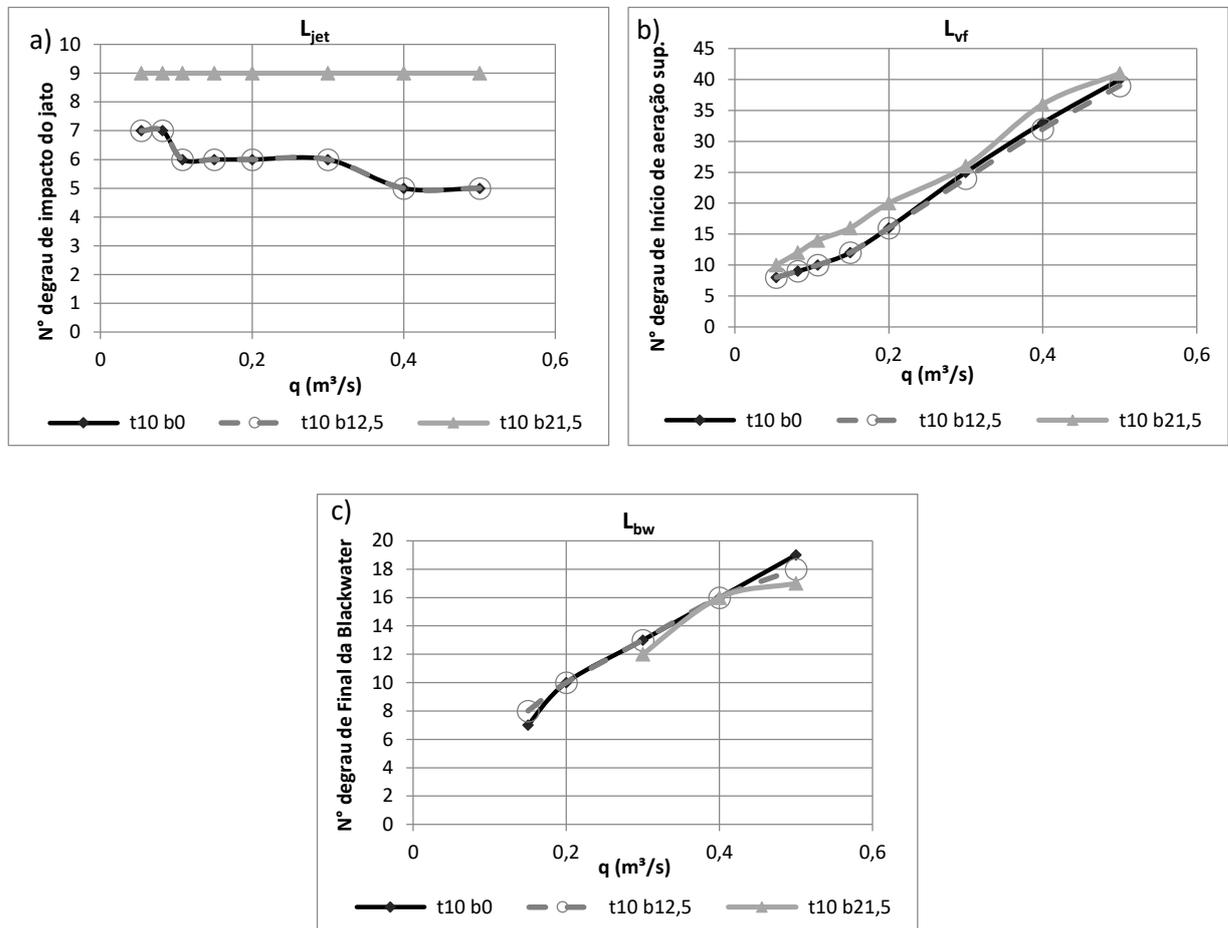


Figura 65- Características do escoamento para o modelo LOH II (a) Impacto do jato no patamar (b) Início do escoamento gradualmente uniforme e (c) ponto de final da blackwater.

O degrau de início de aeração inferior não está apresentado graficamente, pois coincide com o degrau de impacto do jato, já que, assim que o escoamento entra em contato com os degraus, é possível visualizar a ocorrência de uma aeração na sua parte inferior. Os resultados referentes ao impacto do jato foram obtidos visualmente e compatibilizados com os verificados através da análise das pressões, observando o local onde as pressões médias nos patamares dos degraus apresentam um pico devido ao alcance da maior parte do jato. O degrau de início de aeração superior foi determinado de acordo com a Figura 50, observando o local onde a água passa a ter aparência de “água branca” em toda a largura da calha além de facilmente se observar ondulações na superfície. Porém, é importante destacar que, como mostra a Figura 66, a zona de transição, compreendida entre o final da blackwater e o início da aeração

superior, encontra-se aerada em toda a profundidade do escoamento e, como será melhor analisado no capítulo referente à estimativa de concentração de ar, já devem existir trocas de ar através da superfície do escoamento.

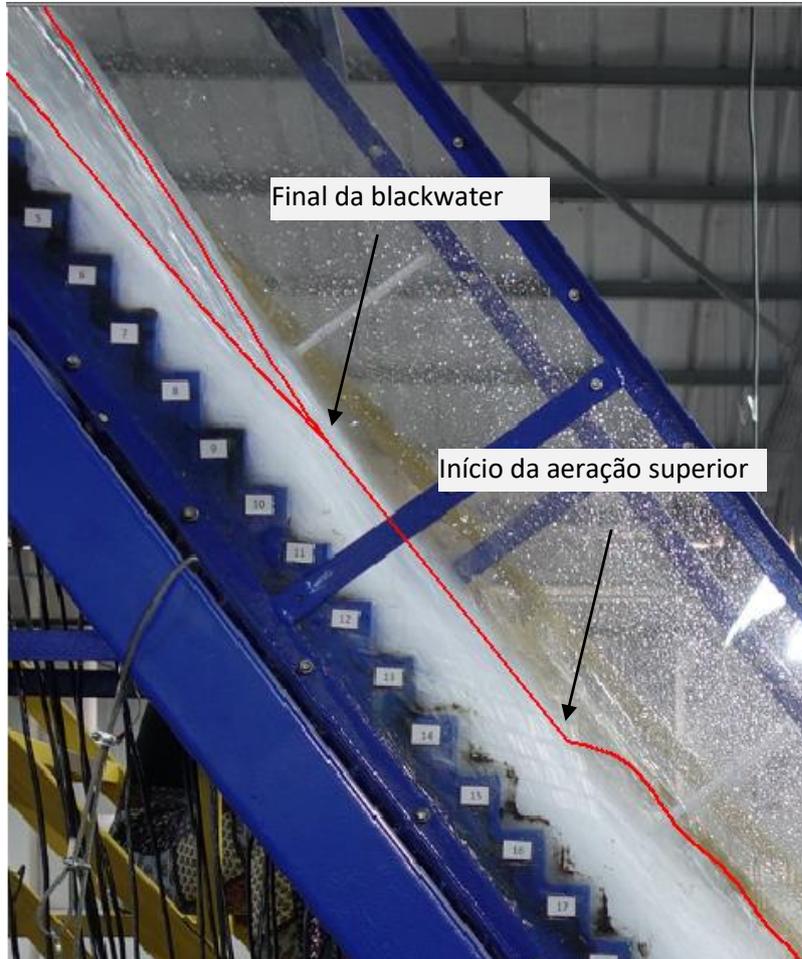


Figura 66 – Posições características do escoamento com aeração induzida o modelo LOH II.

Observando-se o impacto do jato, nota-se que os defletores t10 b0 e t10 b12,5 (Figura 49) geram um jato de mesmo comprimento. Já o defletor t10 b21,5 origina um jato com alcance aproximadamente dois a quatro degraus maior. Contudo, nos demais pontos característicos se nota uma diferença mais sutil na comparação entre os defletores. O ponto de início de aeração superior ocorre ligeiramente mais para jusante no escoamento com o defletor t10 b21,5 em relação aos demais defletores. O ponto de final da blackwater foi registrado a partir da vazão de $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F_{ro}=4,28$) para os defletores t10 b0 e t10 b12,5 e a partir da vazão de $0,300 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F_{ro}=3,47$) para o defletor t10 b21,5, devido à não ocorrer o desenvolvimento do núcleo de blackwater para vazões inferiores. Referente ao ponto de fim da blackwater, embora, para algumas vazões, essa posição tenha sido registrada ligeiramente a montante para o defletor t10 b21,5, não é possível identificar tendências de comportamento

distintas para os diferentes defletores. De modo geral, pode-se dizer que os defletores t10 b0 e t10 b12,5 fornecem resultados de ocorrência das posições características do escoamento praticamente iguais. O defletor t10 b21,5 apresenta resultados diferentes para o ponto de impacto do jato.

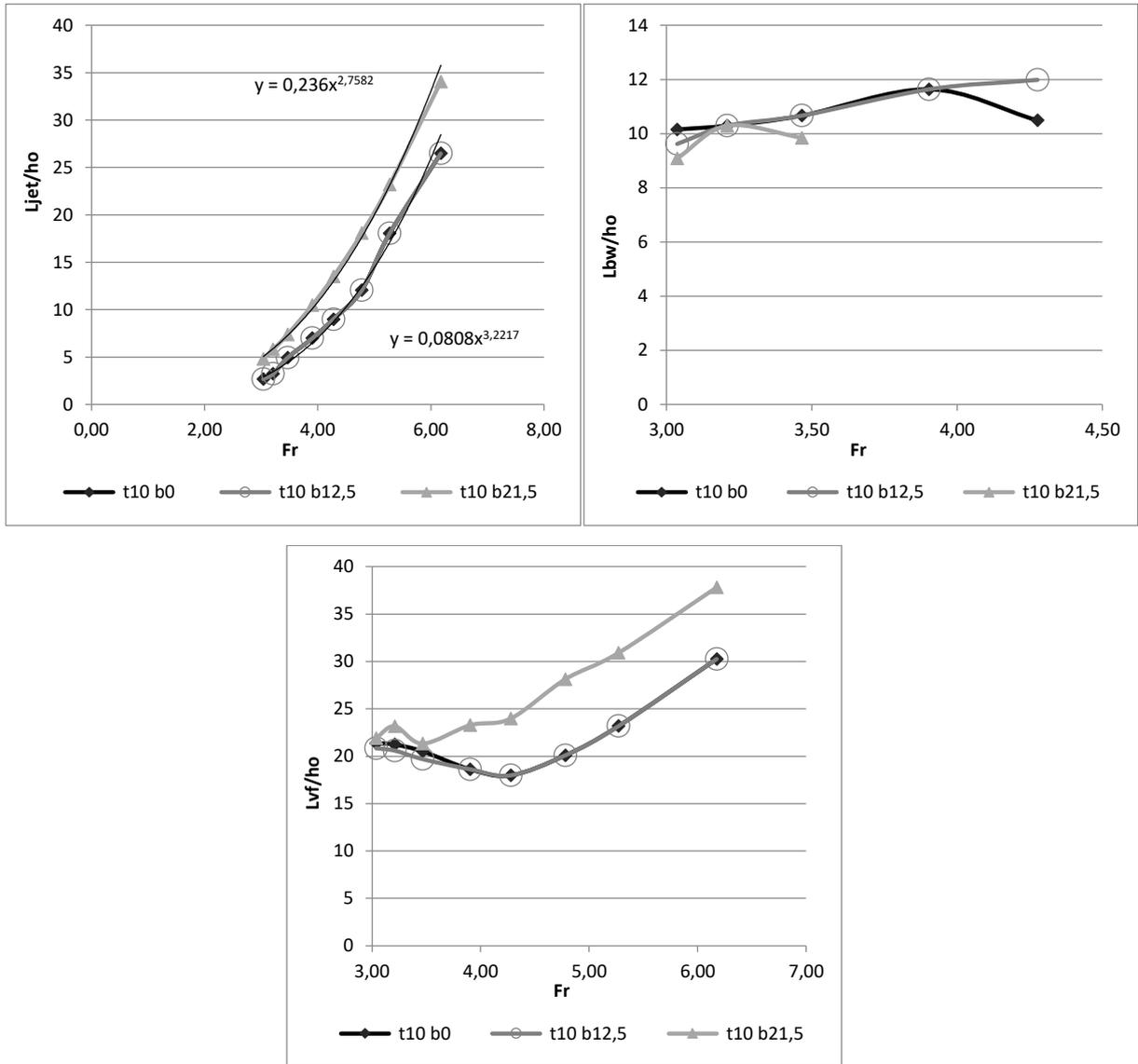


Figura 67 - características do escoamento para o modelo LOH II adimensionalizadas.

Percebe-se que, o ponto final da blackwater ocorre anteriormente ao ponto de início de aeração superior. Observando-se o escoamento, notou-se que, a partir do local onde se inicia o lançamento do jato (posição onde se encontra o defletor), se inicia uma incorporação de ar pela superfície do escoamento. Porém, o que foi determinado como ponto de início de aeração superior foi o ponto onde a incorporação de ar tem início, provavelmente, devido à influência da macrorrugosidade dos degraus, ou seja no momento em que a camada limite atinge a superfície livre do

escoamento. Esse ponto pode ser percebido através da aparência de “água branca” e de ondulações na superfície do escoamento, parecendo ser o ponto equivalente ao ponto de início de aeração determinado em vertedouros em degraus com aeração natural, local onde a quantidade de incorporação de ar pela superfície aumenta consideravelmente. A denominada aeração inferior, que tem início no local do impacto do jato, tende a ter sua altura de lâmina aumentada ao longo da calha até atingir a superfície do escoamento. Sendo assim, concluiu-se que, devido à posição do defletor na calha, a aeração inferior atinge a superfície anteriormente ao desenvolvimento da aeração superior por influência dos degraus.

A Figura 67 apresenta essas posições, detalhadas na Figura 62, adimensionalizadas através da profundidade h_0 . A posição L_{bw} está determinada apenas para números de Froude de aproximação a partir de cerca de 3,0 devido ao núcleo de blackwater não ser identificado para vazões mais baixas devido à altura da lâmina d'água ser menor e o escoamento já atingir a calha aerado. Nesse caso o escoamento torna-se aerado em toda a profundidade da lâmina d'água já nos degraus iniciais da calha.

8.2.1.2 Comparação com aeração natural

O local de desenvolvimento do ponto de início de aeração superior, constatado no escoamento com aeração induzida (AI) foi comparado com o local de ocorrência do ponto de início de aeração natural (AN) visualmente determinado no mesmo modelo (LOH II). A Figura 68 mostra, esquematicamente, o comprimento de início de aeração (L) para ambas as situações e a Figura 69 apresenta a comparação entre os comprimentos de início de aeração.

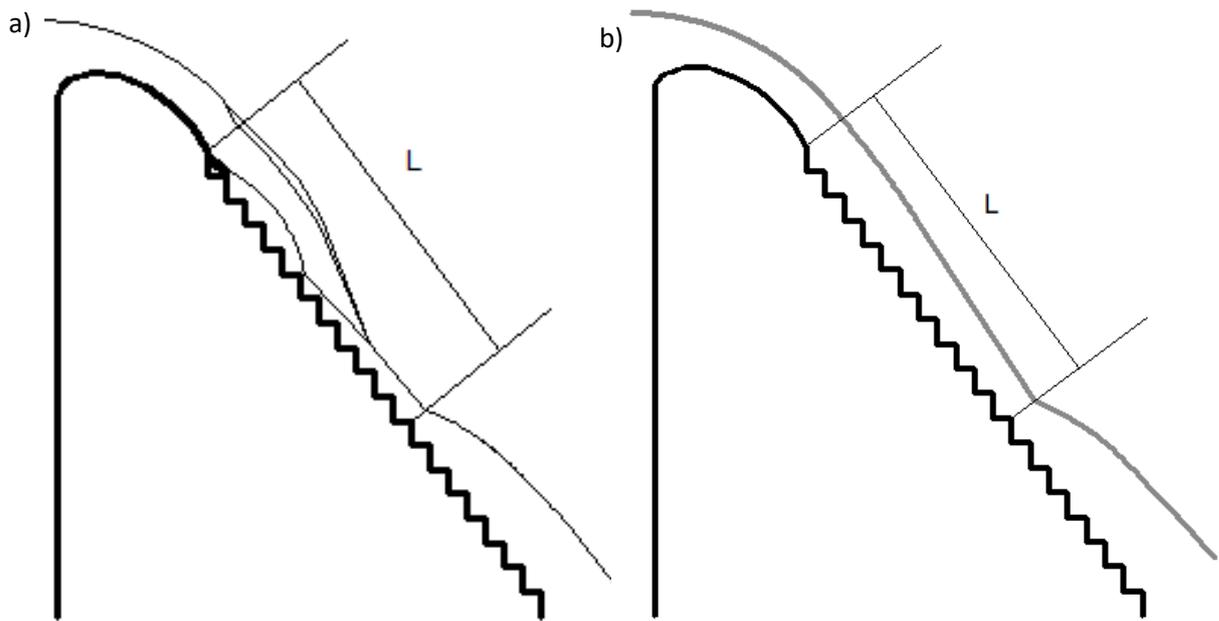


Figura 68 – Comprimento de início de aeração (a) aeração induzida e (b) aeração natural.

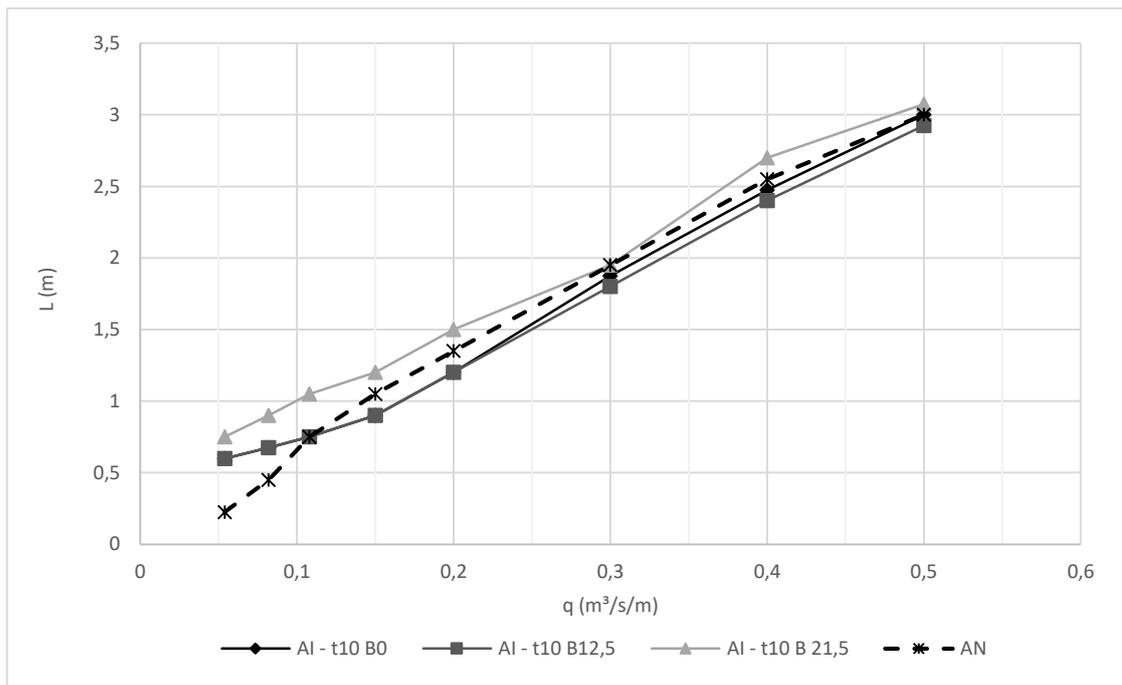


Figura 69 – Comparação entre o comprimento de início de aeração superior para aeração induzida com o comprimento de início de aeração para escoamento com aeração natural.

A indução da aeração não resultou em mudança significativa no início da aeração superior em relação ao ponto de início de aeração no escoamento com aeração natural para a ampla maioria de vazões estudadas. Apenas para as duas menores vazões ensaiadas, percebe-se uma ocorrência do início da aeração mais para montante na situação de aeração natural devido ao início de aeração ocorrer,

nessa situação, a montante do ponto de impacto do jato para a situação de aeração induzida, onde se percebe que, nessas vazões, o início de aeração ocorre próximo ao ponto de impacto do jato. Esse resultado vai ao encontro das conclusões de autores como Pfister et al (2006b).

Contudo, destaca-se que, como visto no item anterior, embora a aeração superior não ocorra a montante para a aeração induzida em relação à aeração natural, o escoamento com aeração induzida possui a aeração inferior, que inicia no momento do impacto do jato nos degraus da calha, permitindo que o fluxo de água possua ar em seu interior em toda a extensão do vertedouro. Além disso, como a aeração inferior atinge a superfície livre anteriormente ao ponto de início de aeração superior (diferentemente das características de escoamento de Pfister et al (2006a e b) e Terrier (2016), por exemplo), será verificada, na sequência, a possibilidade de já ocorrerem trocas de ar pela superfície livre na região entre o ponto de final da blackwater e o ponto determinado como ponto de início de aeração superior.

8.2.2 Pressões desenvolvidas ao longo da calha

As análises dos resultados dos dados de pressão adquiridos no modelo LOH II estão apresentadas separadamente para patamares e espelhos dos degraus. Foi verificada a influência das dimensões dos defletores no escoamento através das pressões médias e extremas com 0,1% e 99,9% de probabilidade de não excedência (P_m , $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$). As pressões médias, além de indicarem a tendência média dos dados para cada situação, são importantes para a análise da influência do impacto do jato no escoamento, principalmente quando observadas junto às quinas dos patamares, além de serem utilizadas na estimativa teórica da concentração de ar no escoamento, como será abordado nos capítulos seguintes. As pressões extremas com probabilidade de não excedência de 99,9% fornecem indicação sobre valores extremos máximos de pressões prováveis de ocorrência nos degraus, e, juntamente com as pressões extremas mínimas prováveis de ocorrência, representadas pela probabilidade de não excedência de 0,1%, permitem a verificação da variação da ocorrência de pressão em um mesmo local. Essas últimas ainda estão relacionadas ao risco de ocorrência de cavitação, que é objetivo direto de interesse do presente trabalho. Entende-se que os danos por cavitação em um vertedouro em degraus podem ocorrer devido à formação das bolhas em regiões e em momentos de baixa

pressão e posterior deslocamento para zonas de alta pressão ou até mesmo formação e explosão das bolhas em locais que ora possuem baixa e hora alta pressão.

Destaca-se que, por motivos de problemas identificados na aquisição de dados, alguns pontos foram retirados da análise de forma a não influenciar, erroneamente, os resultados. A análise foi dividida na verificação da influência da vazão e da geometria do defletor nas pressões. O critério para a exclusão dos pontos dos dados utilizados foi a observação de valores destoantes dos demais, com valores extremos facilmente identificados e fora da tendência dos demais como por exemplo pontos com pressão nula em zonas de altas pressões ou o contrário.

8.2.2.1 Verificação da influência da vazão nas pressões desenvolvidas sobre a calha em degraus

A Figura 70 apresenta os resultados das pressões médias e extremas com 0,1 e 99,9% de probabilidade de não excedência, em m.c.a., para o defletor t10 b0 para os patamares e espelhos dos degraus permitindo a verificação da influência da vazão nas pressões desenvolvidas ao longo da calha em degraus. Os gráficos equivalentes, obtidos para os defletores t10 b12,5 e t10 b21,5 encontram-se no Apêndice L.

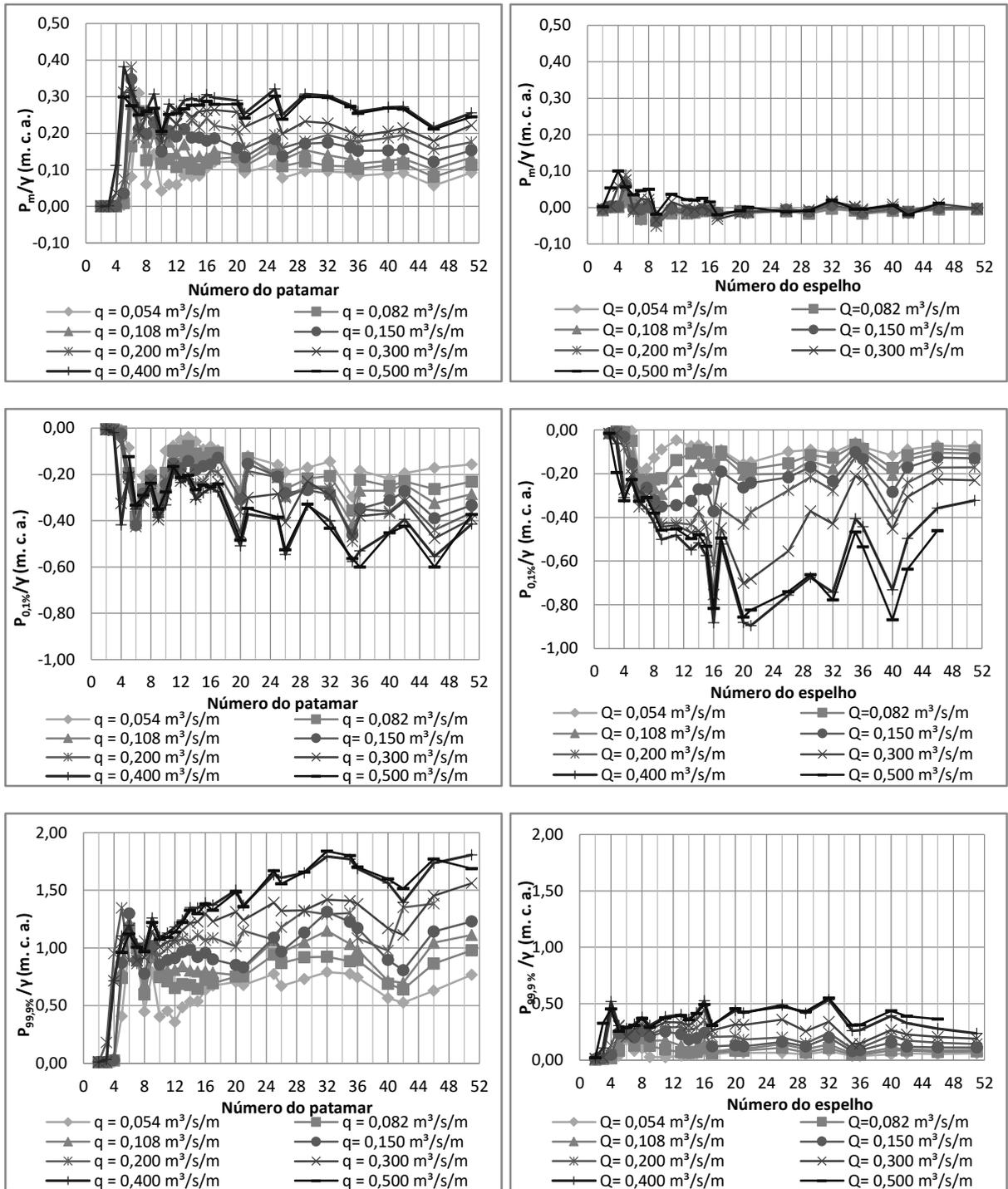


Figura 70 – Pressões desenvolvidas para escoamento com o defletor t10 b0, (a), (c) e (e) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ nos patamares dos degraus e (b) (d) e (f) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ nos espelhos dos degraus.

Pode-se perceber que, tanto para os espelhos quanto para os patamares dos degraus, quanto maior a vazão escoada, mais extremas são as pressões, ou seja, maiores são os valores obtidos para pressão média e $P_{99,9\%}$ e menores são os valores obtidos para $P_{0,1\%}$. Na região onde não existe contato do escoamento com os degraus, na porção inicial da calha, as pressões são praticamente nulas o que corresponde à pressão atmosférica e que pode ser explicado devido à entrada de ar pela câmara de

ar, indicando que a formação do jato é influenciada apenas pela geometria do defletor e pela vazão do escoamento. A análise correspondente à subpressão encontra-se no apêndice M.

Na região de impacto do jato, percebe-se uma elevação abrupta nas pressões para as pressões médias e para $P_{99,9\%}$ e uma redução abrupta para $P_{0,1\%}$. Na região a jusante do impacto do jato, para as pressões médias, nota-se uma redução brusca logo após o impacto do jato e, na sequência, as pressões aumentam tendendo a uma estabilização na porção final da calha. Para nenhuma vazão, as pressões médias ao longo da calha alcançam a magnitude da pressão no impacto do jato, embora essa diferença seja menor para vazões maiores.

Para as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência, para os patamares dos degraus, verifica-se uma elevação das pressões após o impacto do jato até um ponto a partir do qual ocorre uma nova redução, menos abrupta, dos valores de pressão até o fim da calha. Para os espelhos dos degraus, a jusante do impacto do jato, observa-se comportamentos diferentes para vazões maiores e menores. As menores vazões tendem a um aumento das pressões imediatamente após o impacto do jato até um ponto onde atingem uma estabilização. Para as maiores vazões, as pressões continuam decrescendo após o impacto do jato, porém formando uma curva com menor declividade até que atingem um ponto de mínima pressão a partir do qual sofrem uma elevação até o ponto de equilíbrio.

As pressões com 99,9% de probabilidade de não excedência apresentam comportamento análogo ao descrito para $P_{0,1\%}$, porém como valores invertidos em relação ao eixo das abscissas, ou seja, com valores positivos e com maior magnitude para os patamares dos degraus e menor magnitude para os espelhos.

A comparação entre as pressões desenvolvidas nos patamares e nos espelhos dos degraus indica que, para as pressões médias e extremas com 99,9% de probabilidade de não excedência, a magnitude das pressões nos espelhos é significativamente inferior às magnitudes identificadas nos patamares dos degraus. Considerando as pressões com probabilidade de 99,9% de não excedência e as pressões médias nos patamares dos degraus, os valores são inteiramente positivos. Nos espelhos dos degraus, as pressões médias oscilam entre valores positivos e negativos. Para as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência a magnitude dos valores nos espelhos dos degraus é maior em relação aos patamares. Os valores são negativos para ambas as situações.

8.2.2.2 Verificação da influência da geometria do defletor no desenvolvimento das pressões sobre a calha em degraus

A influência das características geométricas do defletor nas pressões desenvolvidas ao longo do vertedouro foram analisadas separadamente para patamares e espelhos dos degraus devido ao seu comportamento distinto. A seguir serão discutidos os resultados obtidos para as pressões médias e extremas com probabilidades de não excedência de 0,1 e 99,9% ($P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$).

8.2.2.2.1 Patamares

Nas Figura 71, Figura 72 e Figura 73 estão comparadas, para os patamares dos degraus, respectivamente, as pressões médias e extremas com 0,1 e 99,9% de probabilidade de não excedência obtidas com aeração induzida com os três defletores testados (AI t103 b0, AI t10 b12,5 e AI t10 b21,5) e com aeração natural (AN) para as vazões de 0,054 m³/s/m e 0,500 m³/s/m. Nas Figura 71, Figura 72 e Figura 73 estão apresentadas apenas a menor e a maior vazões ensaiadas, as demais vazões podem ser observadas no apêndice N.

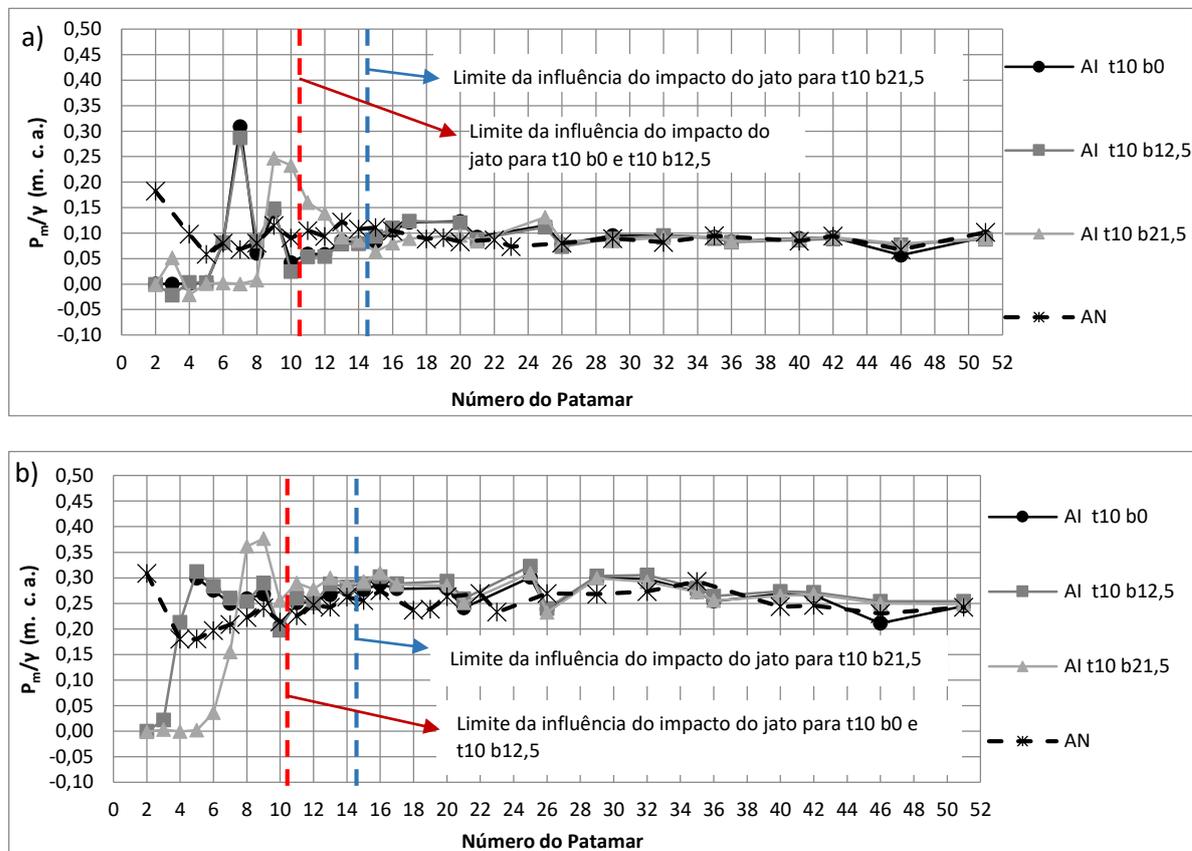


Figura 71 – Pressões médias nos patamares dos degraus para (a) vazão de 0,054 m³/s/m e (b) vazão de 0,500 m³/s/m.

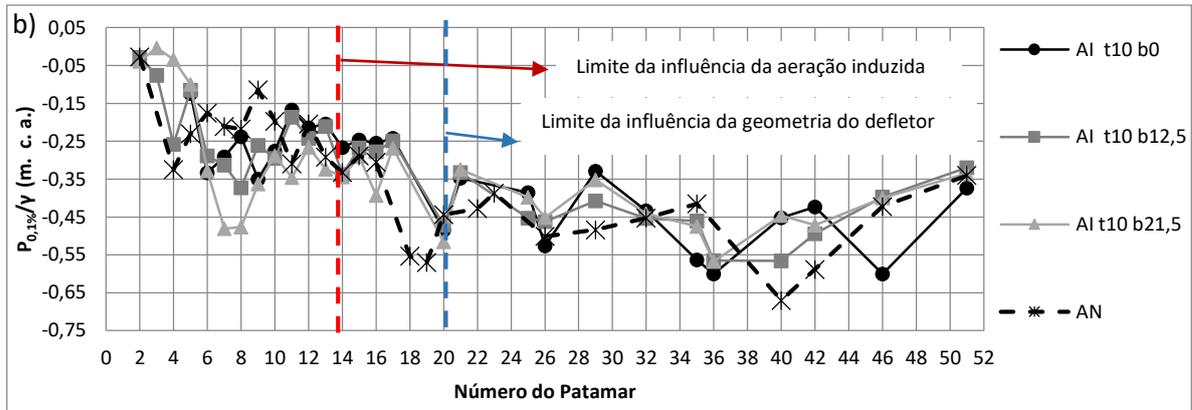
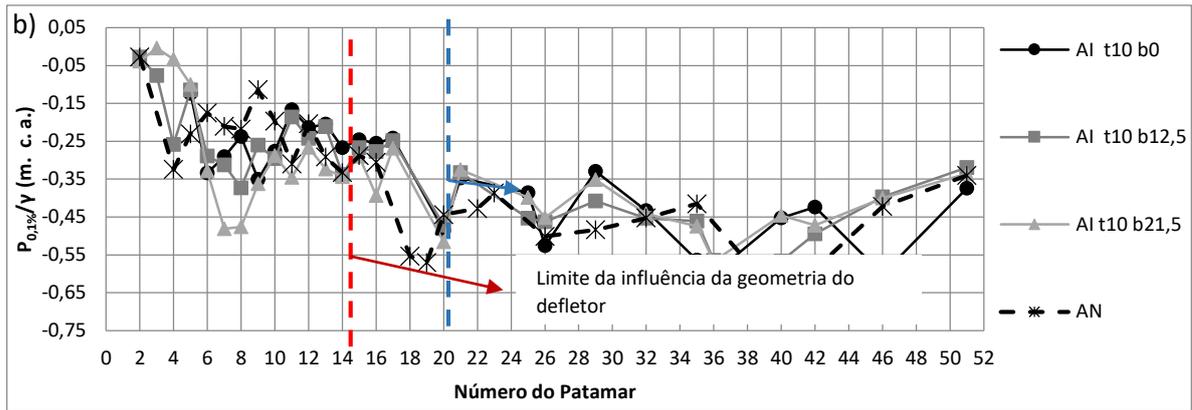


Figura 72 – $P_{0,1\%}$ nos patamares dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

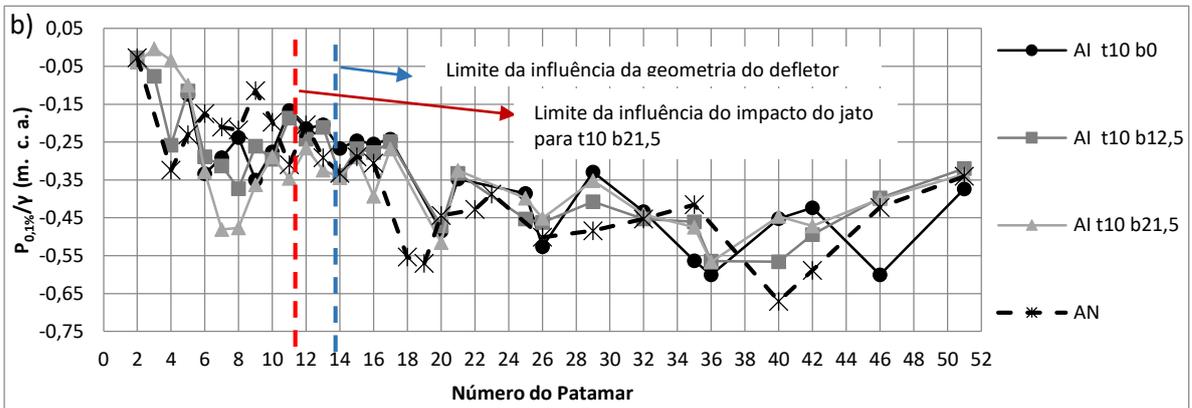
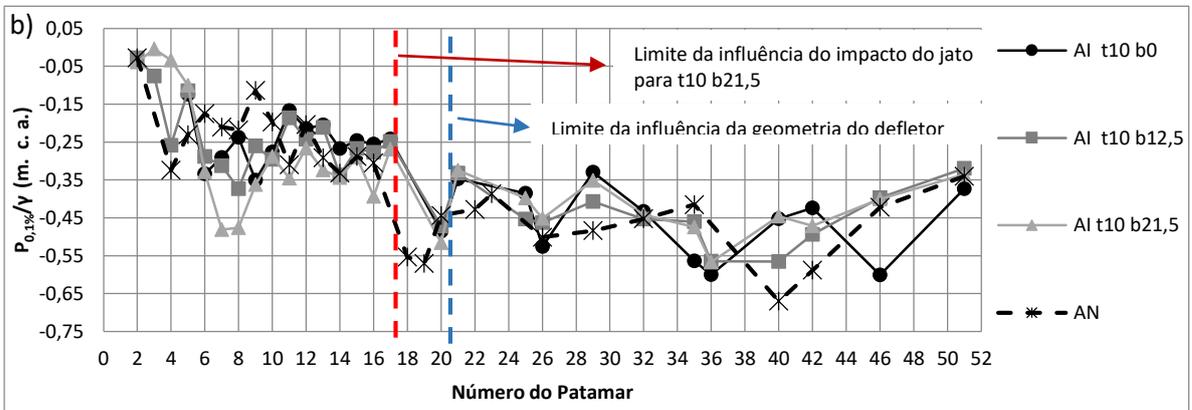


Figura 73 – $P_{99,9\%}$ nos patamares dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Pode-se visualizar que o pico de pressões relacionado ao impacto do jato (que é positivo para pressões médias e $P_{99,9\%}$ e negativo para $P_{0,1\%}$) ocorre praticamente no mesmo local para os defletores t10 b0 e t10 b12,5 e mais a jusante (cerca de dois a 3 degraus) para o defletor t10 b21,5.

Para as pressões médias, percebe-se que a jusante da influência do impacto do jato, as pressões tendem a encontrar os valores desenvolvidos com aeração natural. Essa influência foi identificada, analisando todas as vazões em conjunto, até aproximadamente o degrau 10 para os defletores t10 b0 e t10 b12,5 e até aproximadamente o degrau 14 para o defletor t10 b21,5 (Figura 71).

Analisando $P_{0,1\%}$, para a menor vazão, percebe-se que os picos de pressão negativa, oriundos do impacto do jato, são os menores valores de pressão ao longo de toda a calha, devido aos valores amenos de pressões desenvolvidos com essa vazão. Percebe-se também, uma tendência de aumento das pressões (ou seja, redução de magnitude) com aeração induzida em relação à aeração natural até o degrau 20, posição a jusante da qual não mais se identifica diferenças entre as condições de escoamento. Observando-se apenas os escoamentos com aeração induzida, verifica-se que a influência da geometria do defletor acaba, aproximadamente no degrau 14. Analisando a maior vazão, percebe-se que a relevância do pico de pressão negativa proveniente do impacto do jato perde importância em face da ordem de grandeza das pressões ao longo da calha para essa vazão. Nesse caso, a partir do degrau 12, aproximadamente, não mais se identifica diferenças no comportamento das pressões com aeração natural ou induzida.

Assim como para $P_{0,1\%}$, o pico, dessa vez positivo, observado para $P_{99,9\%}$ tem maior significância para a menor vazão. O comportamento das pressões com probabilidade de 99,9% de não excedência é semelhante para as condições de aeração natural e induzida a partir de aproximadamente o degrau 17 para os defletores t10 b0 e t10 b12,5 e a partir de cerca do degrau 20 para o defletor t10 b21,5 para a vazão 0,054 m³/s/m. Para a vazão 0,500 m³/s/m, os valores equivalentes são degrau 12 e 14. (Figura 73).

8.2.2.2.2 Espelhos

Nas Figura 74, Figura 75 e Figura 76 estão comparadas, para os espelhos dos degraus, respectivamente, as pressões médias e extremas com 0,1 e 99,9% de probabilidade de não excedência, obtidas com aeração induzida com os três

defletores testados (Ai t10 b0, Ai t10 b12,5 e Ai t10 b21,5) e com aeração natural (AN) para as vazões de 0,054 m³/s/m e 0,500 m³/s/m. Nas figuras estão apresentadas apenas a menor e a maior vazões ensaiadas, as demais vazões podem ser observadas no apêndice N.

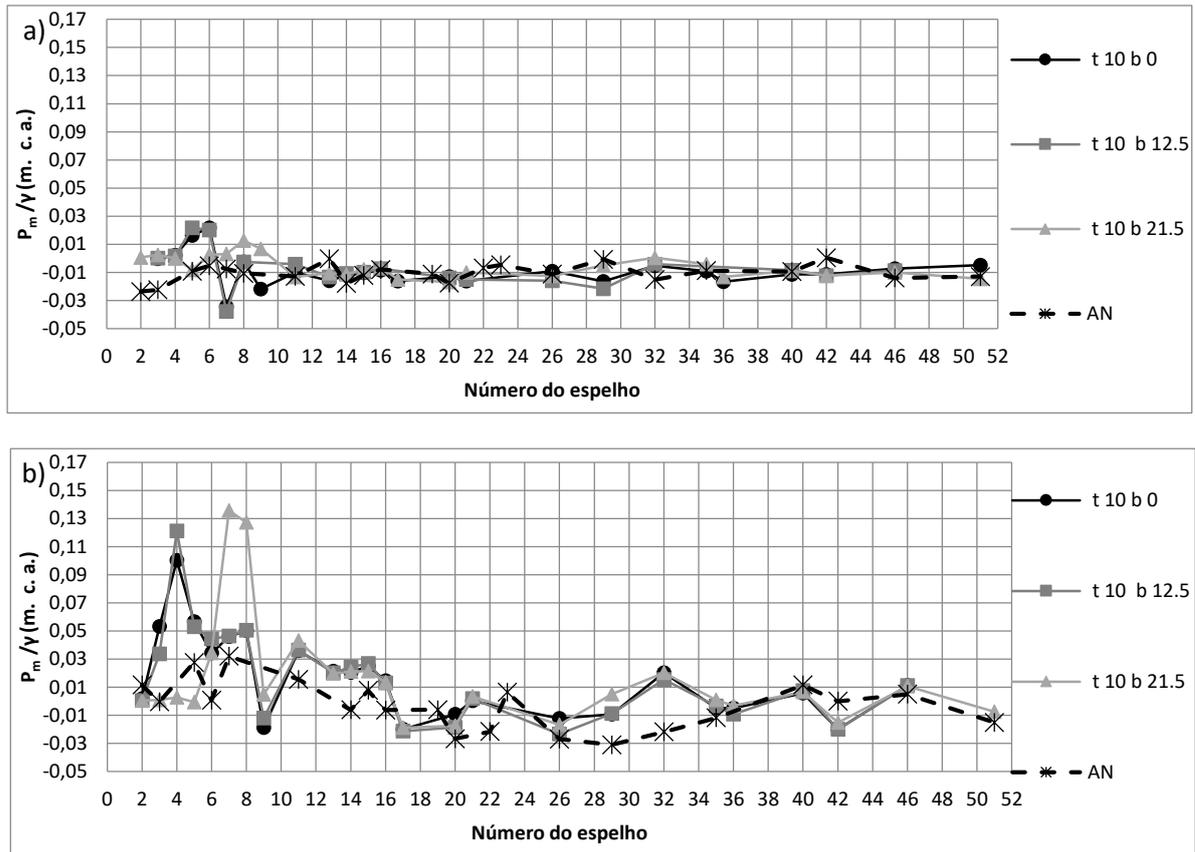


Figura 74 – Pressões médias nos espelhos dos degraus para (a) vazão de 0,054 m³/s/m e (b) vazão de 0,500 m³/s/m.

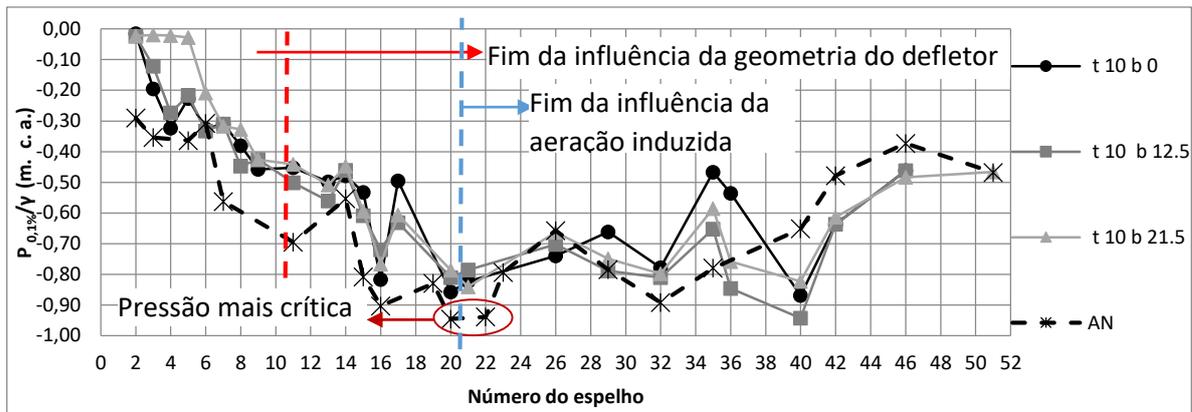
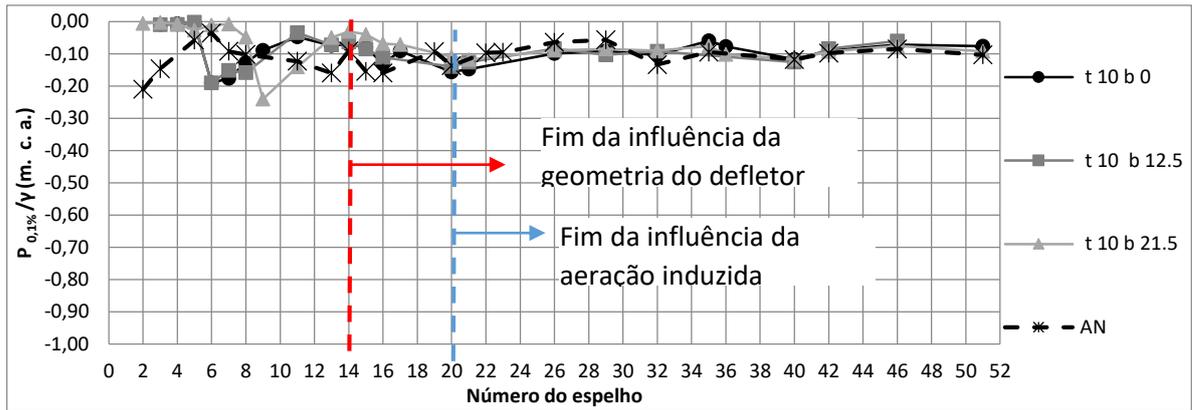


Figura 75– $P_{0,1\%}$ nos espelhos dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

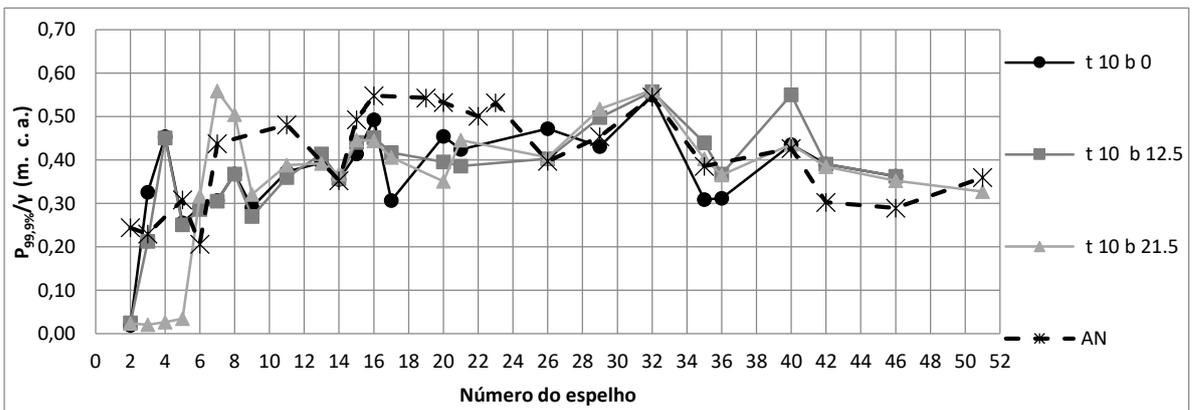
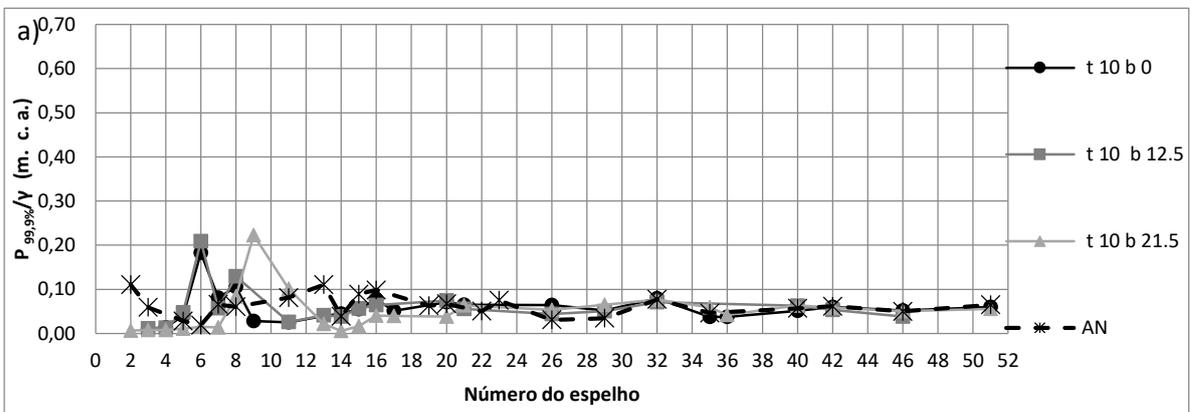


Figura 76 – $P_{99,9\%}$ nos espelhos dos degraus para (a) vazão de $0,054 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) vazão de $0,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Da mesma forma que observado para os patamares dos degraus, pode-se visualizar a ocorrência do pico de pressões (positivo para pressões médias e $P_{99,9\%}$ e negativo para $P_{0,1\%}$) no local de impacto do jato aproximadamente na mesma posição para os defletores t10 b0 e t10 b12,5 e mais para jusante para o defletor t10 b21,5. Observa-se, também, que esse pico tende a ocorrer no espelho de número imediatamente anterior ao patamar, identificado no item anterior caracterizando o comprimento L_{jete} (posição do impacto do jato no espelho do degrau) (Equação 71). Uma justificativa possível para essa característica é a formação de um vórtice entre o patamar do degrau que recebe o impacto do jato e o espelho imediatamente anterior (Figura 77).

$$L_{jete} = L_{jet} - \Delta L$$

Equação 71

Onde: L_{jete} =posição do impacto do jato no espelho do degrau; L_{jet} =posição do impacto do jato no patamar do degrau; ΔL =distância ao longo da calha entre as quinas de dois degraus consecutivos.

A análise das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência é de maior relevância para o presente trabalho por estarem diretamente ligadas à formação das bolhas de vapor que, ao sofrerem maiores pressões implodem formando o processo de cavitação. Por serem as quinas dos espelhos dos degraus a região onde essas pressões desenvolvem maior intensidade, essa é a região de maior interesse para o estudo da $P_{0,1\%}$. Verifica-se que a geometria do defletor pouco influencia do desenvolvimento de $P_{0,1\%}$ com exceção da região próxima ao impacto do jato, que ocorre mais para jusante para o defletor t10 b21,5. Essa influência é observada até, aproximadamente o degrau 10 para a vazão 0,500 m³/s/m e aproximadamente no degrau 14 para a vazão 0,054 m³/s/m.

Comparando-se as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência com aeração induzida e aeração natural, percebe-se que, para as menores vazões, o pico de pressões devido ao impacto do jato resulta na menor pressão desenvolvida ao longo de toda a calha, pois as pressões correspondentes ao escoamento com aeração natural possuem magnitude pouco expressiva. Além disso, esse pico tende a ocorrer no local correspondente à subida das pressões no escoamento com aeração natural, esquematicamente demonstrado na Figura 78, tomando por base o comportamento definido por Canellas (2020). Para as maiores vazões, o pico de pressões devido ao impacto do jato tem menor significância já que as pressões continuam decrescendo a jusante, podendo ser identificado por uma alteração na declividade da curva, que é

acentuada até o ponto de impacto do jato e apresenta menor declividade a jusante até encontrar a curva referente à aeração natural, esquematicamente demonstrado na Figura 78. O comportamento citado para as maiores vazões encontra-se detalhado no Apêndice O. Embora não se perceba um aumento significativo da $P_{0,1\%}$ (atenuação) para a condição de aeração induzida em relação à aeração natural, com exceção da zona de impacto do jato, que se estende até cerca do degrau 20, observa-se que a pressão mais crítica (ou seja, mais negativa) ocorre, para as maiores vazões, para a condição de escoamento com aeração natural. O fato de não existir uma atenuação significativa de $P_{0,1\%}$ no escoamento com aeração induzida em relação ao escoamento com aeração natural não era esperado devido à estudos como Dong et al (2007) mostrarem uma significativa amortecimento nessas pressões e, conseqüentemente, no índice de cavitação no escoamento devido à inserção de ar. Uma possível explicação pode ser o fato de que os estudos dos autores citados foram conduzidos em conduto forçado, não possuindo espaço para o aumento da lâmina d'água com a inserção de ar. Distintamente, a presente pesquisa foi desenvolvida em uma calha em degraus com superfície livre, dessa forma, o escoamento pode ter sua altura ampliada com a inserção de ar, o que de fato ocorreu, como registrado durante os ensaios.

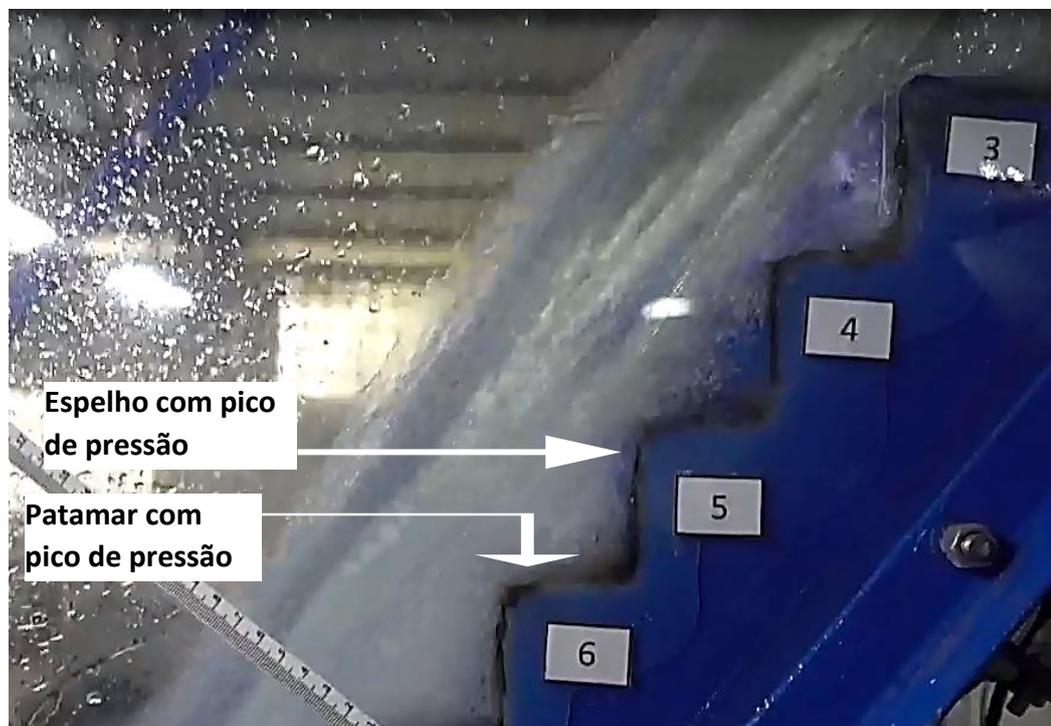


Figura 77 – Patamar e espelho com pico de pressão.

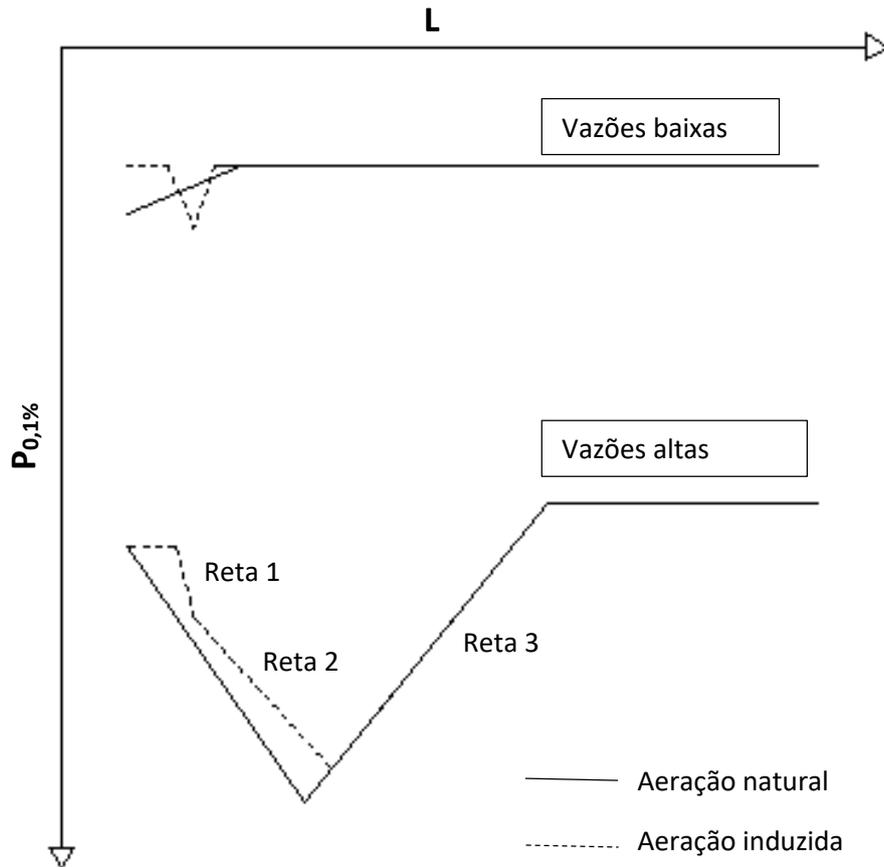


Figura 78 – esquema do comportamento de $P_{0,1\%}$ em escoamento com aeração induzida em relação ao escoamento com aeração natural.

Aplicando-se a adimensionalização da Equação 46 nas pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência para os resultados obtidos com os defletores t10 b0 (vazões a partir de 0,2 m³/s) e t10 b21,5 (vazões a partir de 0,3 m³/s), obteve-se a Figura 79. Nota-se que os pontos de todas as vazões e ambos os defletores podem ser agrupados em uma mesma reta, correspondente à reta 1, reta 2 e reta 3 da Figura 78. Dessa forma, foram feitos os respectivos ajustes resultando no gráfico da Figura 80. Os coeficientes a e b de cada reta encontram-se Tabela 17. Após a posição adimensional 30, as pressões serão constantes com valor igual ao encontrado nessa posição.

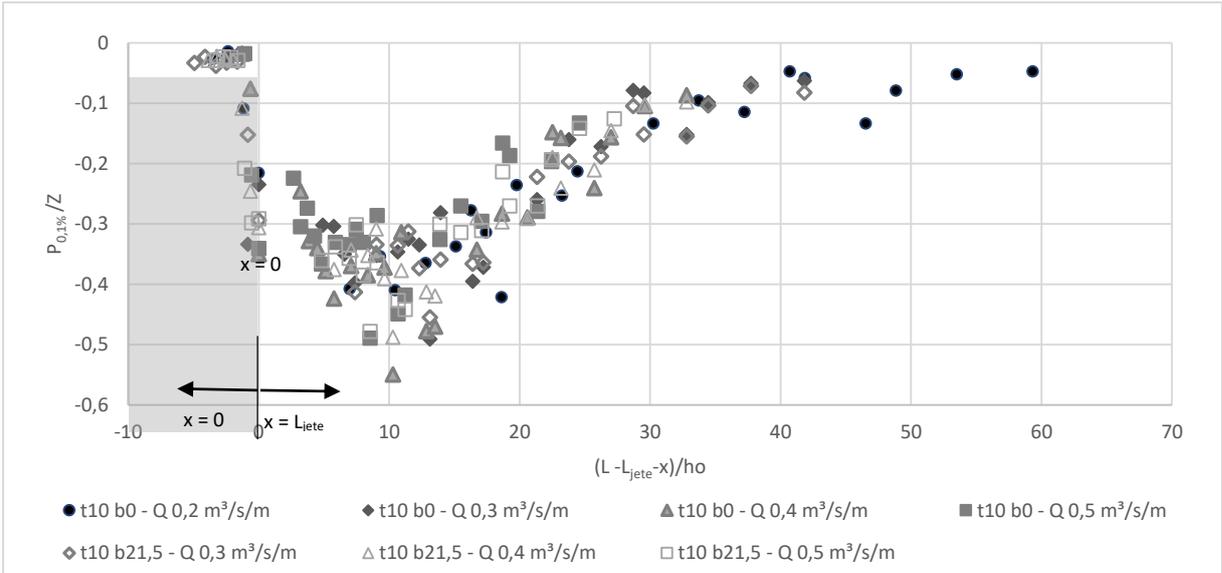


Figura 79 – $P_{0,1\%}$ para os defletores t10 b0 e vazões superiores a 0,2 m³/s dimensionalizadas.

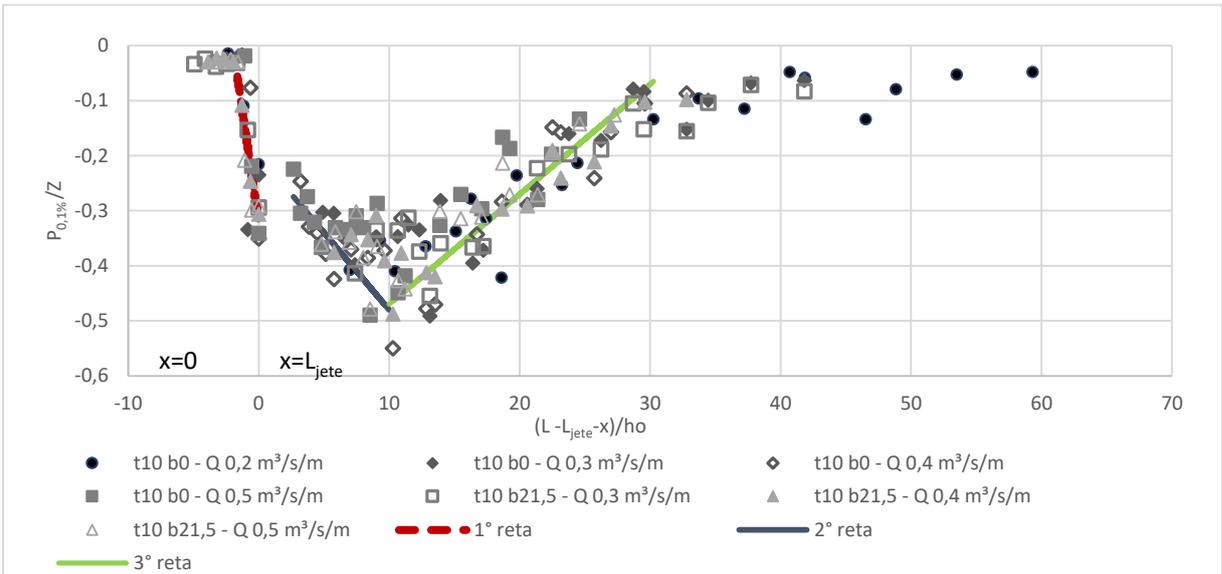


Figura 80 – Ajuste $P_{0,1\%}$.

Tabela 17 – Coeficientes ajustes $P_{0,1\%}$.

Reta	$y = ax + b$	
	a	B
Reta 1	-0,161	-0,32
Reta 2	-0,028	-0,20
Reta 3	0,020	-0,67

Destaca-se que as equações são válidas para escoamentos com número de Froude na entrada do defletor entre 3,04 e 6,17 e para defletores com t/h_0 entre 0,07 e 0,5.

8.2.3 Análise da entrada de ar na câmara de ar

Os dados obtidos para o coeficiente de demanda de ar no escoamento (β) para os três defletores testados estão apresentados na Figura 81, na qual pode-se observar que os valores de β decrescem com o aumento da vazão de água no modelo. Sendo assim, os maiores percentuais encontrados para β correspondem às menores vazões de água escoando sobre a calha. A variação do coeficiente β compreende a faixa de 2% (para maiores vazões de água) até 15% a 20% (correspondentes às menores vazões).

De modo geral, os coeficientes encontrados para o defletor t10 b21,5 são superiores aos dos demais defletores em até 5% de inserção de ar o que vai ao encontro do comprimento do jato, que é maior para esse defletor. O defletor t10 b0 apresenta valores de coeficiente β ligeiramente superiores se comparado ao defletor t10 b12,5 até a vazão de 75 l/s, porém não se pode afirmar que existe uma diferença significativa de demanda relativa de ar para esses dois defletores.

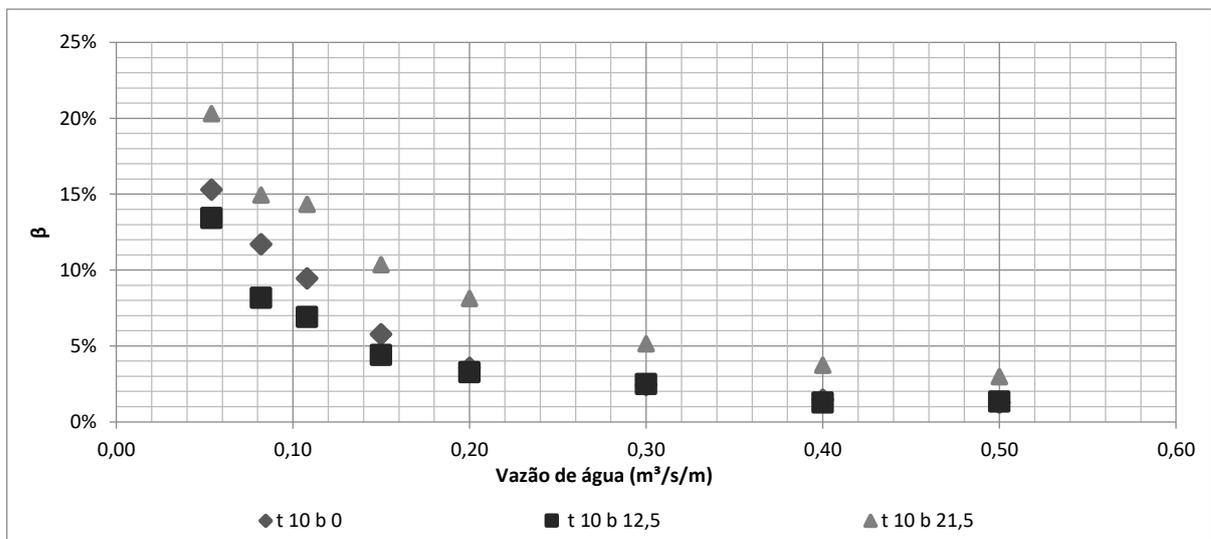


Figura 81 – Coeficientes de demanda de ar para as diferentes geometrias de defletores testadas.

Os dados adquiridos de vazão de entrada de ar na câmara de ar para os três defletores foram comparados com os mesmos dados obtidos por Terrier (2016) (Equação 34 - Tabela 5). A Figura 82 apresenta os resultados. Os pontos em escala de cinzas representam os obtidos pelo autor e os pontos coloridos os obtidos pela presente pesquisa. Para a comparação, os dados de posição foram adimensionalizados através da Equação 72. A Figura 83 apresenta os valores da demanda relativa de ar medidos como função dos mesmos valores calculados através

da Equação 34 elaborada por Terrier (2016) para a estimativa desse parâmetro como função do impacto do jato.

$$\frac{L_{jet}}{h_o}$$

Equação 72

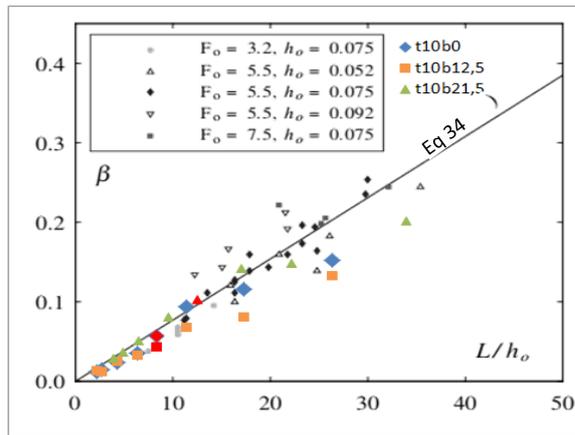


Figura 82 – Valores de coeficiente de demanda de ar comparados com os valores de Terrier (2016).

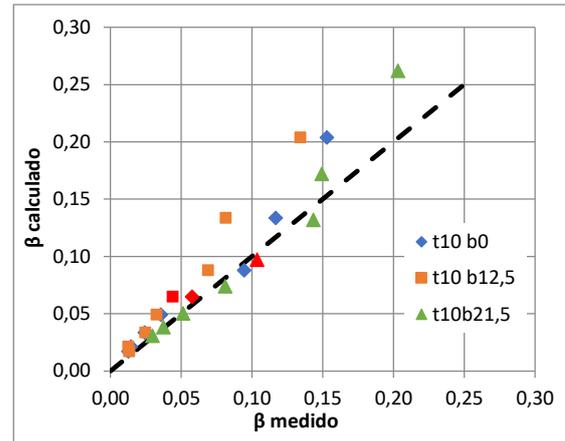


Figura 83 – β calculado x β medido

Através das Figura 82 e Figura 83 percebe-se que os dados referentes aos defletores t10 b0 e t10 b21,5 se ajustaram melhor à equação em relação ao defletor t10 b12,5 e também que os pontos com maior dispersão correspondem às menores vazões, que correspondem às situações com maior demanda relativa de ar. Contudo, como indica a Figura 82, os dados dos três defletores se encontram inseridos na dispersão existente dos dados de Terrier (2016), significando que suas equações são válidas para a presente pesquisa, principalmente para vazões mais altas. Segundo as orientações de Terrier (2016), podem ser comparados com seus resultados escoamentos que atendam as seguintes condições: a) $t/h_o > 0,16$ e b) $L/h_o > 8$. Além disso, o autor informa que seus estudos contemplaram a condição $0,32 \leq h_d/h_o \leq 1,16$. Calculando esses parâmetros para os dados da presente pesquisa, obtém-se o disposto na Tabela 18, na qual se percebe que apenas a vazão de 75 l/s atende a todos os requisitos. O ponto correspondente à vazão de 75 l/s se encontra destacado na cor vermelha nas Figura 82 e Figura 83. Embora apenas essa vazão atenda as exigências necessárias para comparação com os dados do autor, concluiu-se que as suas equações, no que diz respeito à estimativa do coeficiente de demanda de ar (β) podem ser extrapoladas para $t/h_o \geq 0,06$, $L/h_o \geq 1,79$ e $0,32 \leq s/h_o \leq 3,02$.

Tabela 18 – Parâmetros para comparação com dados de Terrier (2016)

q (m ³ /s/m)	t/h _o	L/h _o	h _d /h _o
0,054	0,50	26,47	3,02
0,082	0,33	17,37	1,98
0,108	0,25	13,33	1,52
0,150	0,19	8,39	1,12
0,200	0,14	6,39	0,85
0,300	0,10	3,64	0,58
0,400	0,074	2,21	0,44
0,500	0,060	1,79	0,35

8.2.4 ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE AR AO LONGO DO ESCOAMENTO

A estimativa da concentração de ar junto ao fundo do canal foi feita separadamente para cada região do escoamento, através de diferentes metodologias como explicado no item 7.1.4. Essa estimativa foi realizada para a condição de escoamento com aeração induzida com os defletores t10 b0 e t10 b21,5. A opção pelo estudo desses dois defletores se baseou nas análises do coeficiente de entrada de ar e das posições características do escoamento que indicaram que não houve diferenças significativas entre os defletores t10 b0 e t10 b12,5, e que o defletor t10 b21,5 apresentou maior coeficiente de entrada de ar e maior comprimento de impacto do jato. Para o defletor t10 b0, a estimativa da concentração de ar foi feita para as 4 maiores vazões (0,200, 0,300, 0,400 e 0,500 m³/s/m) por serem as vazões com maior risco de ocorrência de cavitação. Para o defletor t10 b21,5, apenas foi possível aplicar o procedimento para as três maiores vazões (0,300, 0,400 e 0,500 m³/s/m) porque, devido ao maior comprimento de lançamento do jato, não foi identificada uma zona de blackwater bem definida até a vazão de 0,200 m³/s/m, o que impede a aplicação do método $Q_{aer} \times h_{aer}$.

Como explicado no item 7.1.4, para a zona de blackwater, a concentração de ar foi obtida diretamente pelo método $Q_{ar} \times h_{aer}$, enquanto para as zonas do escoamento aerado, primeiramente foi estimada a concentração média de ar pelos métodos $P \times h_{naer}$ e $h_{aer} \times h_{naer}$ e posteriormente aplicada metodologia de Wood (1984 apud MATOS, 1999) para a determinação da concentração de ar no fundo do canal.

8.2.4.1 Zona de Blackwater

O método $Q_{ar} \times h_{aer}$ foi aplicado para a extensão da calha desde o degrau onde foi identificado o impacto do jato até o ponto de final da blackwater, identificado visualmente. A Figura 84 exibe os resultados da concentração de ar média na lâmina inferior do escoamento (aerada) para ambos os defletores e para cada vazão utilizada para a estimativa.

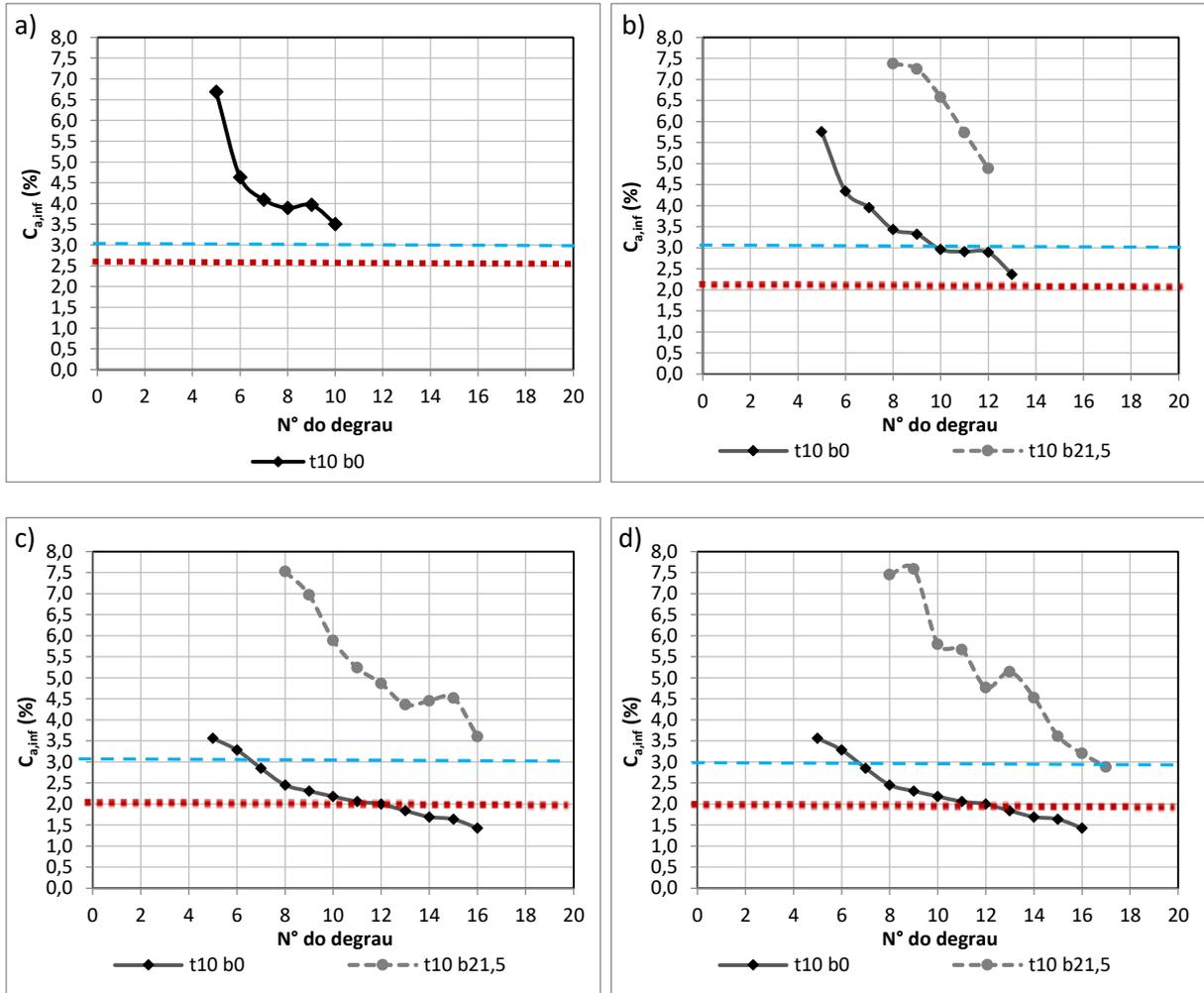


Figura 84- concentração de ar pelo método $Q_{ar} \times h_{aer}$ para as vazões (a) $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (b) $0,300 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (c) $0,400 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (d) $0,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Percebe-se que as concentrações de ar são superiores para o defletor t10 b21,5, o que vai ao encontro dos resultados do coeficiente da entrada de ar e do comprimento do jato. Considerando-se a concentração de ar de 2% (linha vermelha pontilhada), indicada por Peterka (1953) como limite inferior a partir do qual se tem início a proteção do concreto contra possíveis danos por cavitação, na zona de blackwater, atingem esse resultado todas as vazões com o defletor t10 b21,5 e as vazões $0,200$ e $0,300 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ para o defletor t10 b0. Para esse último, as vazões mais altas atingiram

concentrações menores de 2% para as regiões próximas ao ponto de final da blackwater. Se for considerado o estudo de Semenov e Lentiaev (1973), considerando um concreto com resistência de 40Mpa, uma concentração de 3% de ar (linha azul tracejada) seria suficiente para proteção completa da estrutura. Dessa forma, o defletor t10 b21,5 atingiria a segurança para praticamente todas as vazões (apenas a vazão de 0,5 m³/s/m apresenta concentração de aproximadamente 2,88%).

8.2.4.2 Zona totalmente aerada

A metodologia $P \times h_{naer}$ foi aplicada em toda a zona totalmente aerada a partir do ponto de final da blackwater para a estimativa da concentração média de ar nas seções transversais do escoamento. Em todos os casos, foi feita a verificação de que o impacto do jato não mais exerce influência nas pressões médias obtidas nos patamares dos degraus nesse ponto. Como se observou que: 1) a influência do impacto do jato nessas pressões cessa a partir do degrau 10 para o defletor t10 b0 e do degrau 14 para o defletor t10 b21,5 para as vazões 0,300 e 0,400 m³/s/m e degrau 12 para a vazão 0,500 m³/s/m (aproximadamente 20 m³/s/m em protótipo (discutido no item 8.2.2.2) e 2) os pontos de final de blackwater ocorrem mais para jusante em relação aos degraus mencionados; concluiu-se que essa metodologia pode ser aplicada em toda a extensão da calha a partir do ponto de final da blackwater.

A metodologia $h_{naer} \times h_{aer}$ também foi aplicada após o ponto de final da blackwater. Como o método se baseia na comparação da lâmina d'água do escoamento com aeração induzida com a porção não aerada do escoamento com aeração natural, foi aplicado apenas até o ponto de início de aeração correspondente em ensaios com aeração natural. Esse método tem aplicação limitada devido ao mencionado anteriormente e, por isso, sua aplicação teve importância comparativa, de forma a confirmar a tendência dos resultados obtidos com o método $P \times h_{naer}$, o que pode ser visualizado na Figura 85 na qual se observa resultados de concentração média de ar próximos para o mesmo defletor.

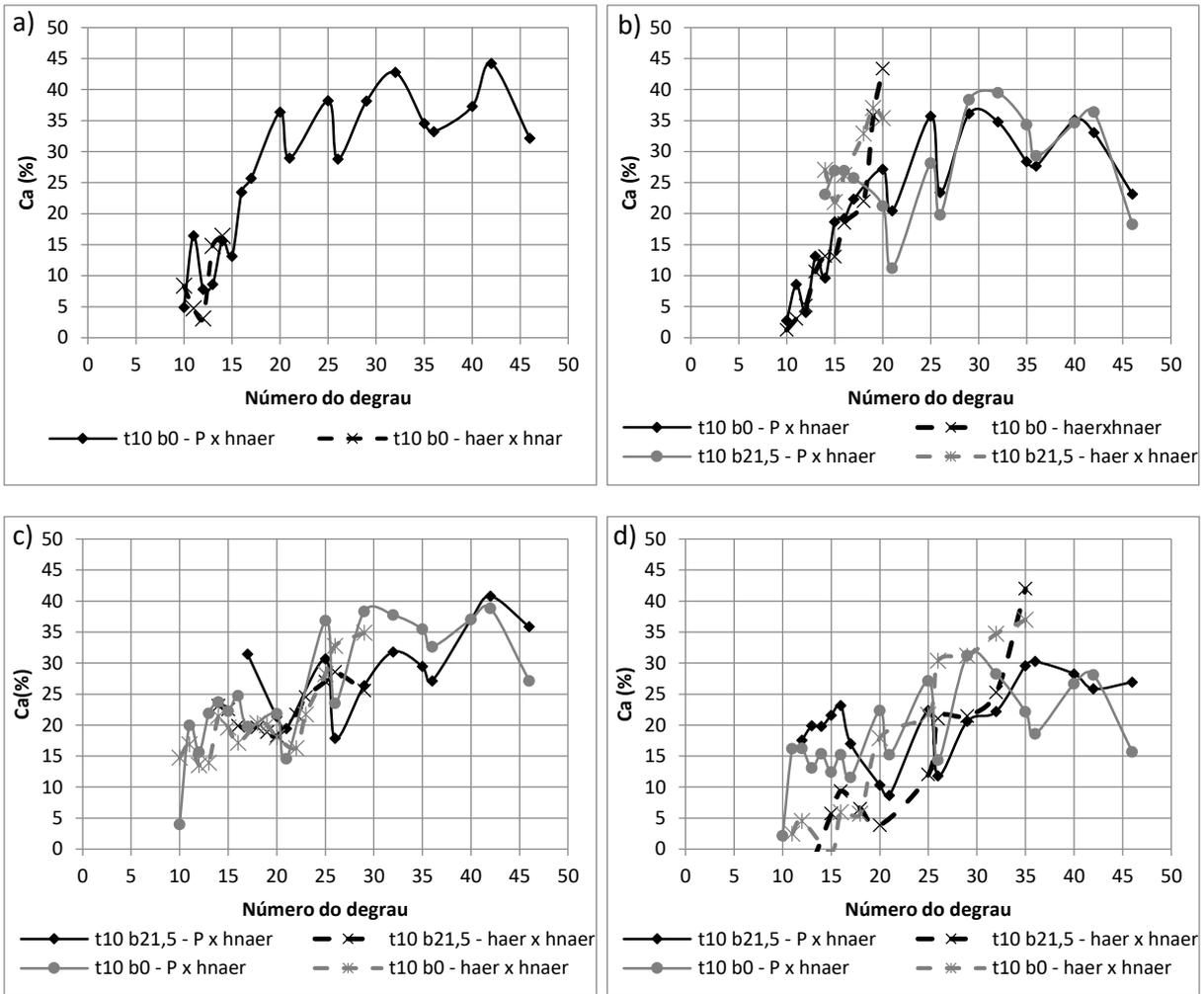


Figura 85 -- concentração de ar pelos métodos P x hnaer e haer x hnaer para as vazões (a) 0,200 m³/s/m, (b) 0,300 m³/s/m, (c) 0,400 m³/s/d e (d) 0,500 m³/s/m.

Comparando os defletores, percebe-se que nas posições mais de jusante não se verifica diferenças significativas, esse limite ocorre aproximadamente no degrau 15 para a vazão de 0,300, m³/s/m, no degrau 20 para a vazão de 0,400 m³/s/m e no degrau 25 para a vazão de 0,500 m³/s/m. A montante desse valor as concentrações de ar tendem a ser mais baixas para o defletor t10 b0. Percebe-se também, que a concentração média de ar estabiliza em valores aproximados entre 30 e 45%, valores que podem ser considerados próximos às concentrações de estabilização de autores como Matos (1999), Pfister (2006a) a Terrier (2016), que apresentam valores entre 40% e 60% de concentração de ar em escoamentos com aeração natural ou induzida, dependendo das características do escoamento e do vertedouro. Admite-se que no presente trabalho esses os resultados possam apresentar valores razoavelmente inferiores devido às determinações a favor da segurança que foram tomadas

considerando-se o objetivo de avaliação da concentração de ar como proteção à estrutura de concreto contra possíveis danos por cavitação.

A partir da concentração média de ar foi aplicado o método de Wood (1984 apud MATOS, 1999) para a estimativa da concentração de ar no fundo do canal. Salienta-se que esse método foi desenvolvido para estimativa da concentração de ar no fundo do canal para vertedouros com aeração natural, diferentemente da situação de aeração induzida do presente trabalho. Porém, entende-se que existe um ponto no escoamento em que o ar proveniente da aeração induzida, inserido pelo fundo do canal não mais é significativo frente à vazão de ar inserida ao escoamento pela superfície livre, assemelhando-se ao escoamento com aeração natural e, dessa forma, tornando válida a aplicação da metodologia de Wood (1984 apud MATOS, 1999). Para a determinação do ponto limite inferior para aplicação dessa metodologia, foram ajustadas curvas aos dados de concentração de ar média obtidos pelo método $P \times h_{naer}$ e visualmente determinado um ponto de mudança de declividade que entende-se que marca um ponto onde a inserção de ar pela superfície já é significativa e tende à uma estabilização (interseção da linha vermelha no gráfico com a curva de ajuste da concentração de ar. Percebe-se que esse ponto também é próximo ao local onde as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência com aeração induzida começam a ser semelhantes à com aeração natural. Contudo, observando-se as pressões, tem-se o mesmo ponto para o defletor t10b0 e t10b21,5. Acredita-se que essa diferença pode se dar por dois motivos. O primeiro, devido à diferença da aeração entre os dois defletores não ser suficiente para alterar as pressões ou devido a imprecisões no método de cálculo da concentração de ar. De qualquer forma, optou-se por seguir a análise da concentração de ar, devido à sua maior sensibilidade em relação à análise de pressões.

Na sequência, foi aplicada a metodologia de Wood (1984, apud MATOS, 1999) para uma altura de 0.32 cm de forma a caracterizar a concentração de ar no fundo da calha. A metodologia foi aplicada nos dados resultantes do método $P \times h_{naer}$ e um novo ajuste foi feito como mostra a Figura 86 para o defletor t10 b0 para a vazão de 0,200 m³/s/m. Os resultados obtidos para as demais vazões para o defletor t10 b 0 e para o defletor t10 b21,5 encontram-se no apêndice P. O valor máximo de concentração de ar obtido, referente ao local de escoamento quase-uniforme, é inferior a valores presentes na bibliografia (como Matos (1999) para calha com aeração natural e Boes e Hager (2003) e Terrier (2016) para calha com aeração

induzida). Entende-se que essa característica ocorre devido à concentração de ar no fundo do canal ter sido estimada com base na concentração de ar média que pode estar subestimada devido às decisões tomadas sempre a favor da segurança ao longo da presente pesquisa, como salientado em 8.2.4.2.

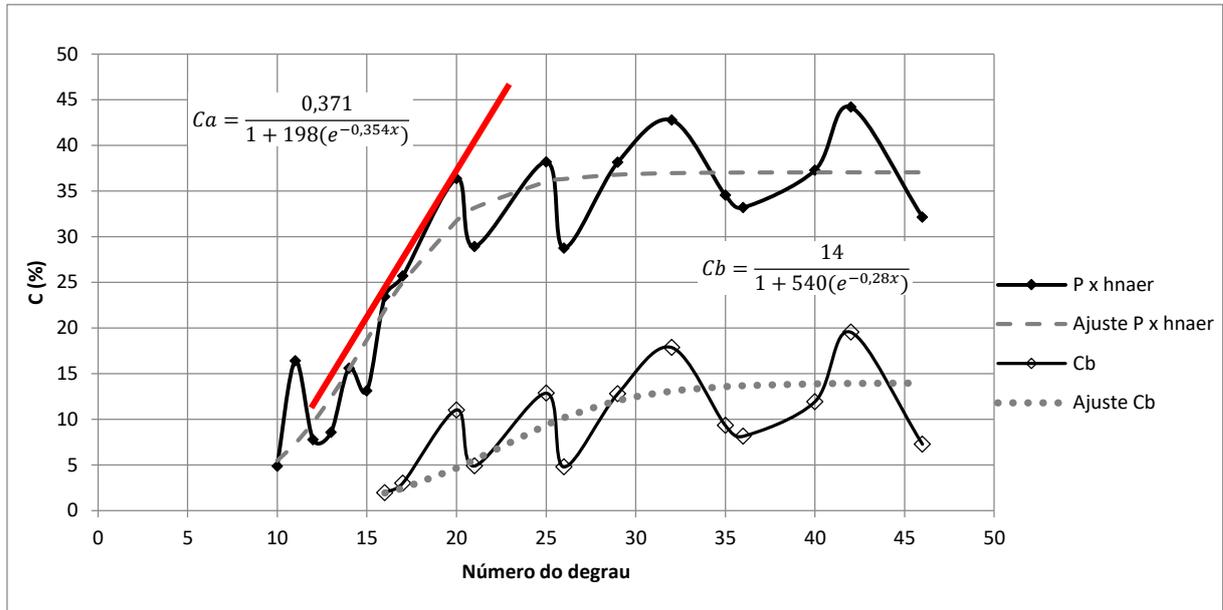


Figura 86 – Concentração de ar média e de fundo para o defletor t10 b0 para a vazão de 0,200 m³/s/m.

8.2.4.3 Totalidade da calha

Após a aplicação dos métodos anteriormente mencionados, obteve-se a concentração de ar no fundo da calha desde a posição do impacto do jato até o final da blackwater e depois desde o limite definido pela Figura 86 até o final da calha, existindo uma zona de falha como mostra a Figura 87. Visando solucionar esse problema, o ajuste da curva de concentração de ar no fundo obtido para a zona de blackwater foi feito de forma a ligar esses pontos à curva resultante do ajuste $P \times h_{naer}$. Essa decisão levou em consideração que não deve haver um ponto de mínima concentração de ar entre os valores finais obtidos com um método e iniciais obtidos com o outro. Entende-se que o ponto de mínima concentração de ar deve ocorrer no ponto de iminência de significativa influência da vazão de ar absorvida através da superfície livre do escoamento em relação à vazão de ar induzida pelos elementos aeradores, já que essa diminui ao longo da calha. Esse resultado obtido para o defletor t10 b0 com escoamento com vazão de 0,100 m³/s/m pode ser visualizado na Figura 88 comparando-se com a concentração de ar de 2% e 3%. Os mesmos resultados para as demais vazões e para o defletor t10 b21,5 podem ser observados no apêndice

Q. Percebe-se que todas as vazões superiores a 0,200 m³/s/m com o defletor t10 b21,5 atingem valores de concentração do ar no fundo inferiores a 2% enquanto apenas a vazão de 0,500 m³/s/m atinge valor inferior a esse limite. As concentrações de ar resultantes para todas as vazões ensaiadas em função do comprimento da calha estão apresentadas, separadamente para cada defletor nas Figura 89 e Figura 90.

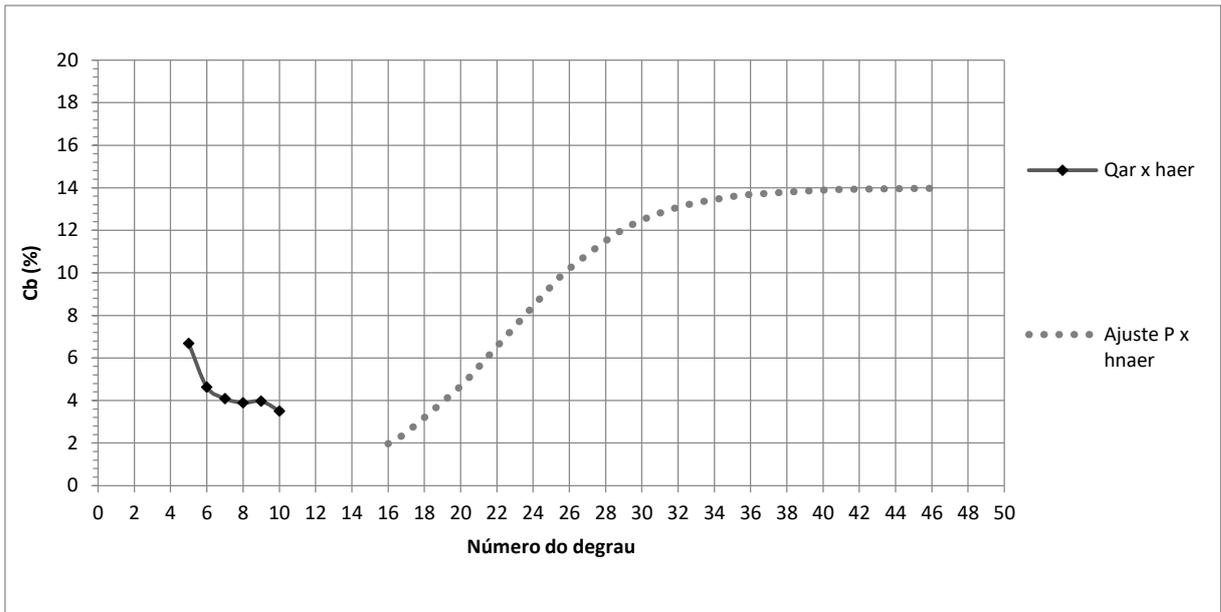


Figura 87 – Concentração de ar no fundo para ambos os métodos para o defletor t10 b0 e vazão de 0,200 m³/s/m.

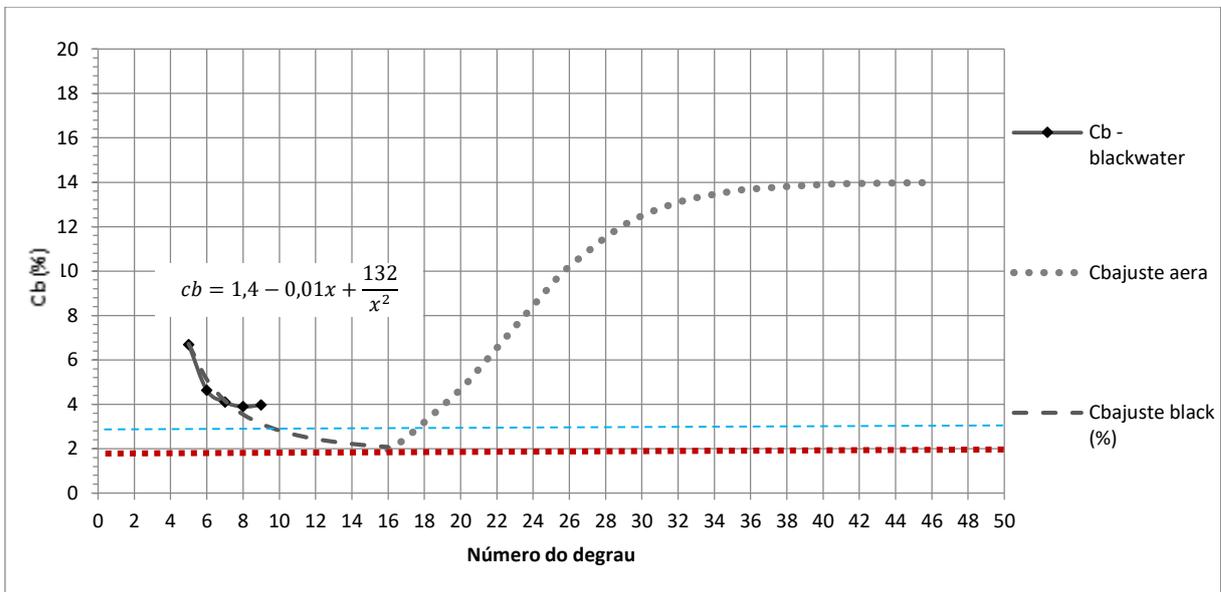


Figura 88 – Concentração de ar no fundo para a totalidade da calha para o defletor t10 b0 e vazão de 0,200 m³/s/m.

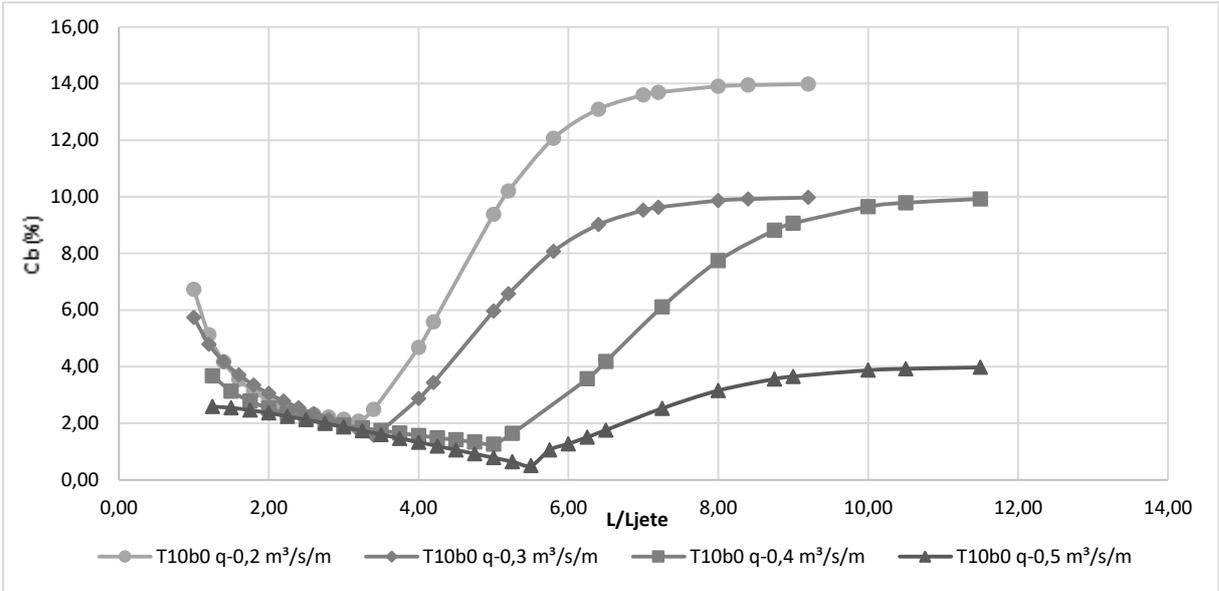


Figura 89 - Concentração de ar no fundo da calha para todas as vazões ensaiadas para o defletor t 10b0.

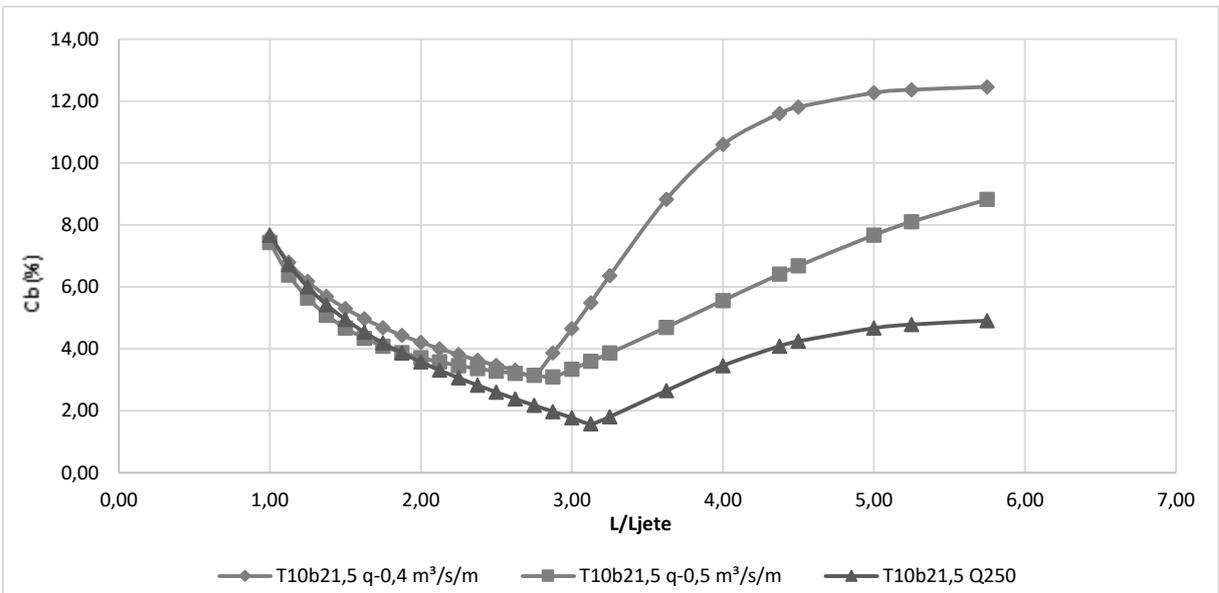


Figura 90 – Concentração de ar no fundo da calha para todas as vazões ensaiadas para o defletor t 10b21.

8.2.5 Comparação da concentração de ar no fundo e das pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência

Com o intuito de avaliar em conjunto a possibilidade de ocorrência do fenômeno de cavitação e a proteção fornecida ao concreto pela concentração de ar, foi feita uma comparação da concentração de ar estimada junto ao fundo da calha com as pressões com probabilidade de não excedência de 0,1% em valores de protótipo calculadas através das equações apresentadas na Tabela 17 e Figura 80. A partir do último ponto da terceira reta, admite-se que o escoamento atingiu pressões constantes. A análise dessas pressões em valores de protótipo possibilita que sejam identificadas zonas em

que ocorrem pressões abaixo de 10,09 m.c.a., correspondente à pressão de vapor da água. Destaca-se que os valores de pressão abaixo da pressão de vapor são meramente indicativos de que nessa zona irá ocorrer o fenômeno mencionando, porém não correspondem à pressão que ocorrerá na realidade.

A Figura 91 apresenta os resultados obtidos para o escoamento com o defletor t10 b0 e a Figura 92 para o defletor t10 b21,5. As figuras mostram as concentrações de ar, pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência, limites de $P_{0,1\%}$ para ocorrência de cavitação ($P_{0,1\%} = -10,09$ m.c.a.) e de concentração de ar para início de proteção ao concreto ($C_b=2\%$) e proteção total ($C_b=8\%$) segundo Peterka (1953) e 3% para proteção total em concretos de 40 Mpa, segundo Semenov e Lentyaev. (1973) e o ponto de início de aeração caso fosse um escoamento com aeração natural, permitindo a verificação da vantagem da aeração induzida comparada à aeração natural em relação à concentração de ar. Os resultados obtidos com o defletor t10 b0 indicam que a partir da vazão de 0,4 m³/s/m já existem zonas com pressões abaixo de -10,09 m.c.a. e concentração de ar abaixo de 2%, o que limitaria a utilização do vertedouro à vazões de 0,3 m³/s (ou seja 17,4 m³/s/m em protótipo considerando-se escala 1:15). Dessa forma, embora se possa identificar que a concentração de ar superior a 2% tem início cerca de 12 graus antecipadamente em relação ao ponto de início de aeração em escoamento com aeração natural para a vazão de 0,4 m³/s/m (23,2 m³/s/m em protótipo), não se obtém um acréscimo na magnitude da vazão a ser escoada pela estrutura utilizando-se o defletor considerando-se os valores limites existentes na bibliografia.

Considerando-se o defletor t10 b21,5, no escoamento com vazão de 0,4 m³/s não mais existem zonas com concentração de ar abaixo de 2% e $P_{0,1\%}$ abaixo de -10,09 m.c.a. Para a vazão de 0,5 m³/s (29 m³/s/m em protótipo) observa-se uma zona com essa condição, mas destaca-se que a região compreende cerca de três graus e que a menor concentração de ar obtida foi de 1,6%. Considerando-se o limite de 3%, a mesma análise é válida, sendo a única vazão que oferece condições de incipiência à cavitação dentre as testadas é a de 0,5 m³/s/m.

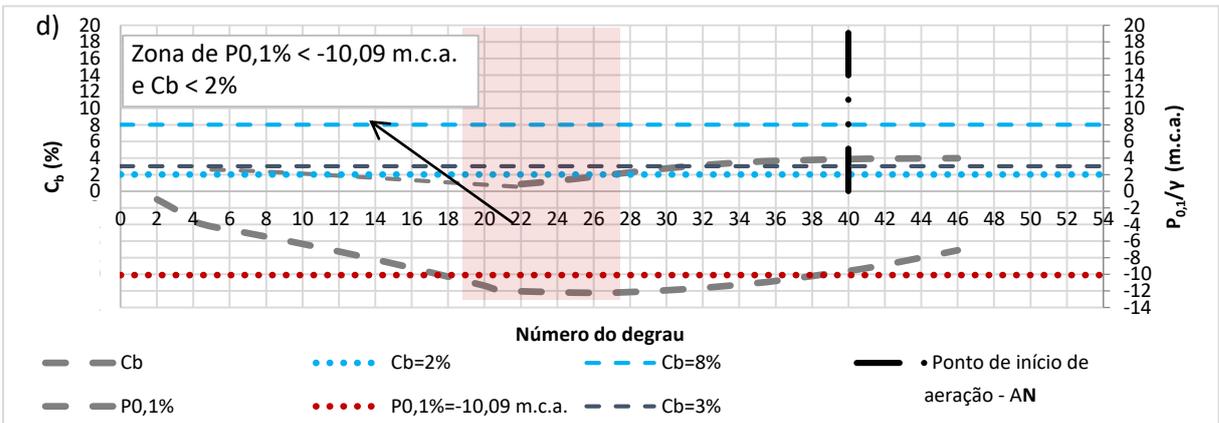
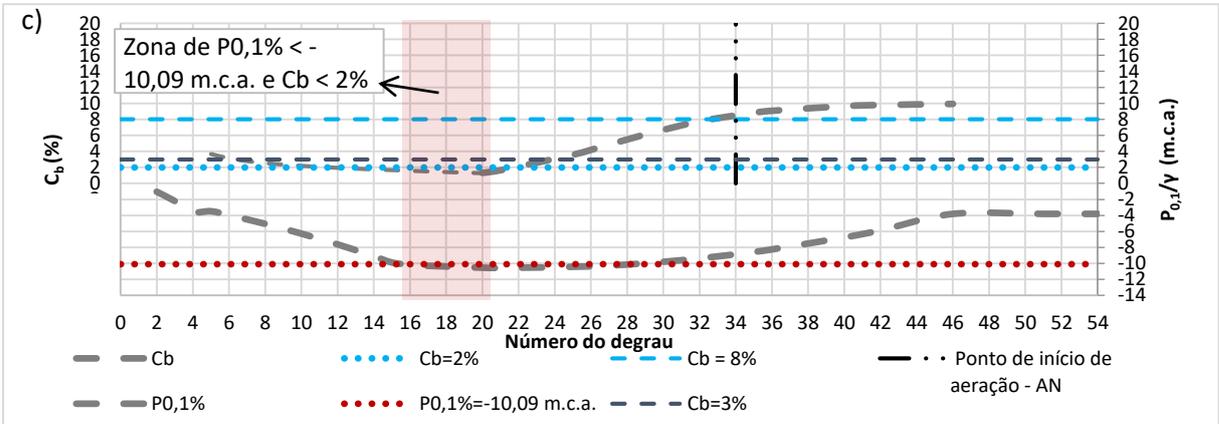
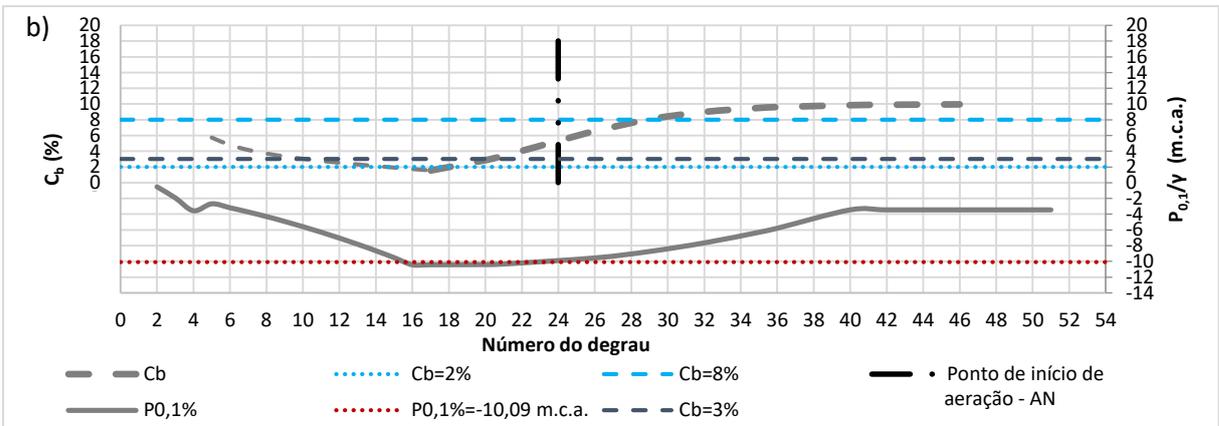
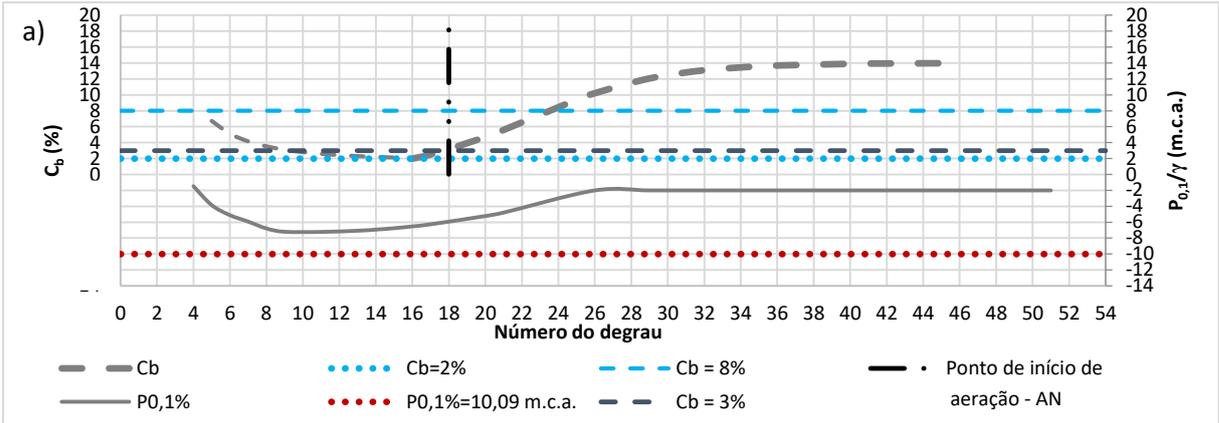


Figura 91 – C_b x $P_{0,1}$ para o defletor t10 b0 e vazões (a) $0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (b) $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (c) $0,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (d) $0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

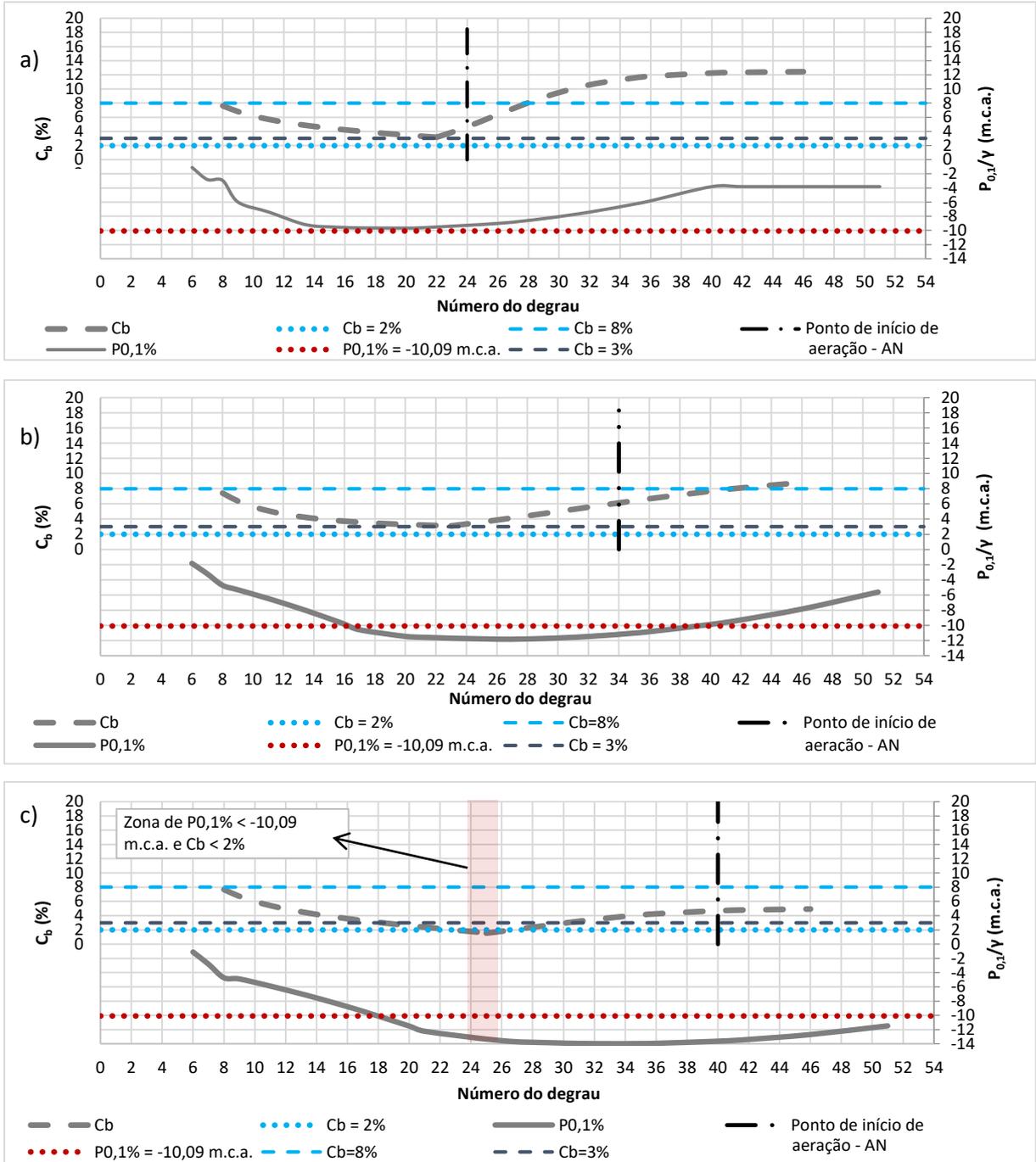


Figura 92 - $C_b \times P_{0,1}$ para o defletor t10 b21,5 e vazões (a) $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (b) $0,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (c) $0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Segundo Peterka (1953) a concentração ideal para que se possa garantir a segurança do concreto é de cerca de 8%, porém, para as condições ensaiadas esse limite apenas foi atingido na metade final da calha no momento em que a aeração proveniente da aeração induzida é irrelevante frente à aeração introduzida ao escoamento através da superfície livre. Devido a esse motivo, foi considerado o limite de 2% de concentração de ar para avaliação das vantagens em relação à aeração natural, valor acima do qual a proteção ao concreto tem início. Foi considerado,

também o valor de 3% seguindo as recomendações de Smenkov e Lentiaev (1973), para a proteção total de um concreto com 40Mpa de resistência.

8.3 ANÁLISE DA DISSIPAÇÃO DE ENERGIA

Para a verificação da influência da aeração induzida na dissipação de energia, foram realizadas três diferentes análises: a) comprimento do ressalto hidráulico; b) desenvolvimento de pressões na bacia de dissipação e c) balanço de energia.

8.3.1 Comprimento do ressalto hidráulico

Os resultados referentes ao comprimento do ressalto hidráulico, em valores dimensionais e adimensionais, estão apresentados Figura 93 na qual se percebe a não ocorrência de diferenças significativas entre aeração natural e aeração induzida com diferentes geometrias de defletores. Esse resultado indica que a dissipação de energia na calha não é influenciada pela aeração induzida. A diferença máxima encontrada em valores absolutos foi de 0,26 m para a vazão específica de 0,22 m³/s/m. A mesma conclusão pode ser observada através de análise das fotografias registradas durante os ensaios visualizados na Figura 94 para a vazão de 60 l/s ($Fr_o = 5,31$). Os registros fotográficos para as demais vazões podem ser visualizados no Apêndice R.

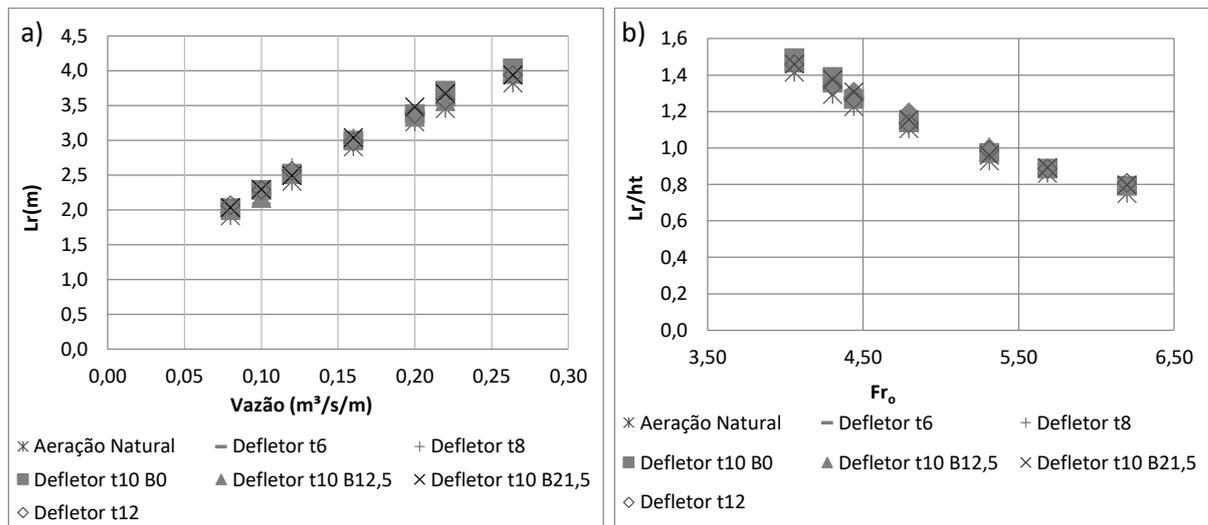


Figura 93 – Comprimento do ressalto hidráulico (a) valores dimensionais e (b) valores adimensionais.

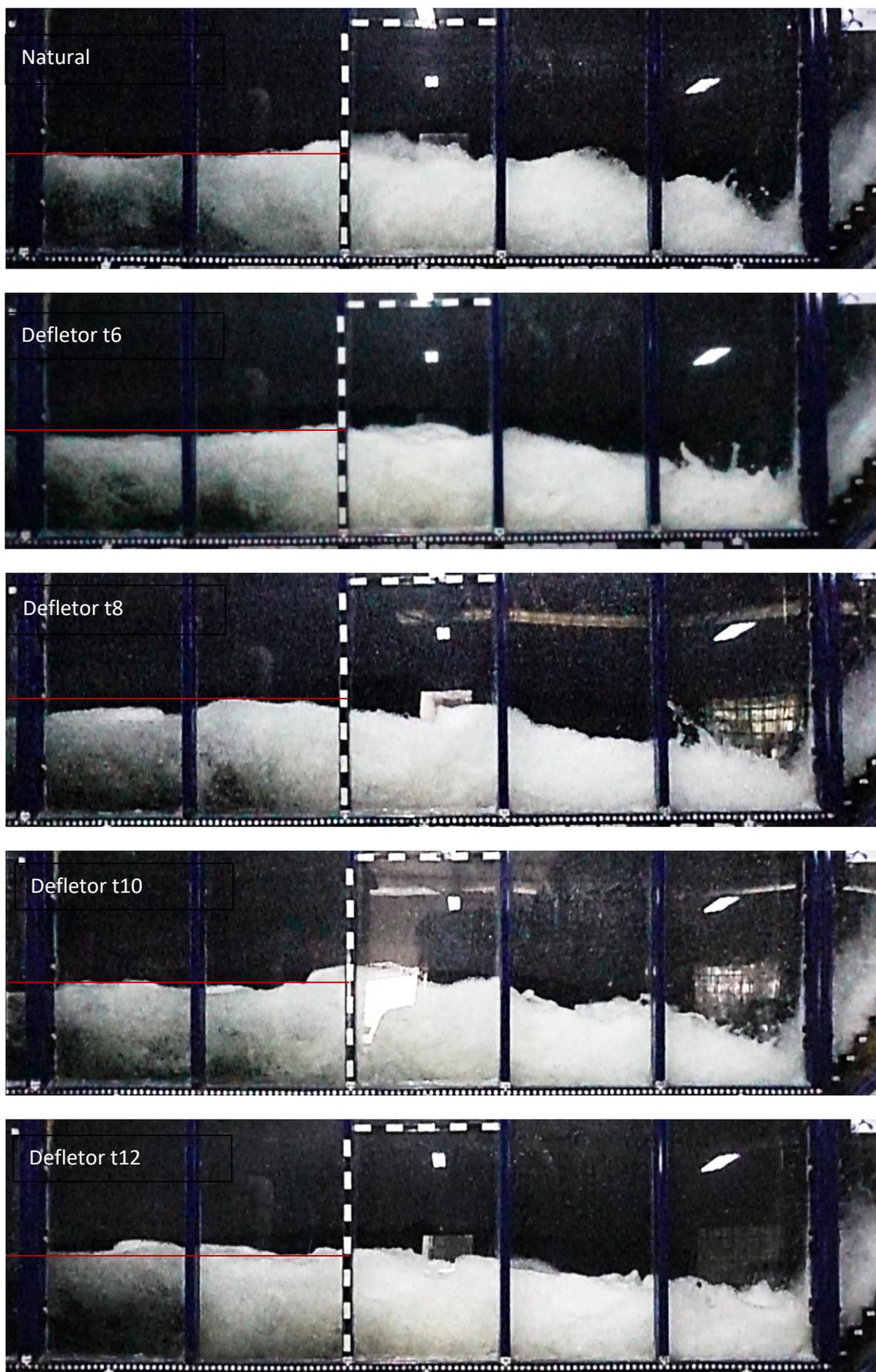


Figura 94 - Ressaltos hidráulicos visualizados para a vazão de 60 l/s.

8.3.2 Pressões desenvolvidas na bacia de dissipação

Os valores das pressões médias medidas na bacia de dissipação na tomada de pressão mais próxima ao pé do vertedouro estão apresentados na Figura 95. Assim como para o comprimento do ressalto hidráulico, não foi observada influência significativa no desenvolvimento das pressões no pé do vertedouro, o que indica que a dissipação de energia também não é alterada com a indução da aeração. A diferença máxima encontrada em valores absolutos foi de 0,023 m.c.a. para a vazão específica de 0,08 m³/s/m.

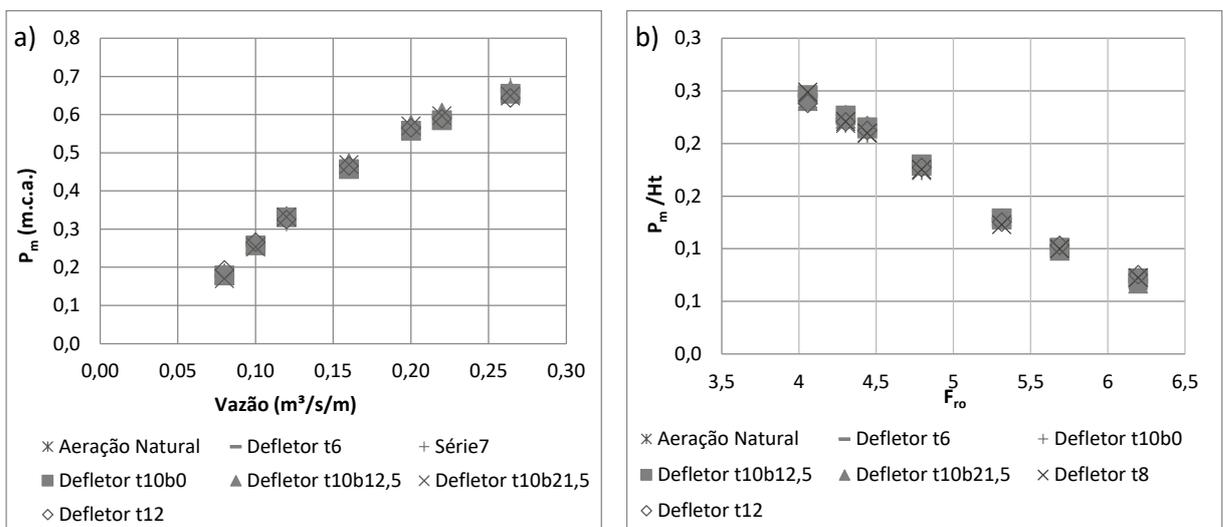


Figura 95 – Pressões médias desenvolvidas no pé do vertedouro, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.

8.3.3 Balanço de Energia

Para reforçar as conclusões obtidas até o momento, foram analisados os resultados dimensionais e adimensionais para os parâmetros energia residual no final da calha (E_r), energia na saída do ressalto hidráulico (E_i), energia dissipada no ressalto hidráulico (E_{dr}) e energia dissipada na calha do vertedouro (E_{dc}), para o modelo LOH I podem ser visualizados nas Figura 96 a Figura 99. As diferenças máximas encontradas em valores absolutos para cada parâmetro citado, em valores absolutos foi, respectivamente de 0,173, 0,009, 0,154 e 0,126 m. Assim como nas análises de comprimento do ressalto hidráulico e das pressões desenvolvidas na bacia de dissipação, a análise de balanço de energia não mostrou diferenças significativas, em nenhum dos parâmetros estudados, da aeração induzida em comparação à aeração natural, podendo-se concluir que a aeração induzida não influencia, positiva ou negativamente, a dissipação de energia ao longo da calha em degraus.

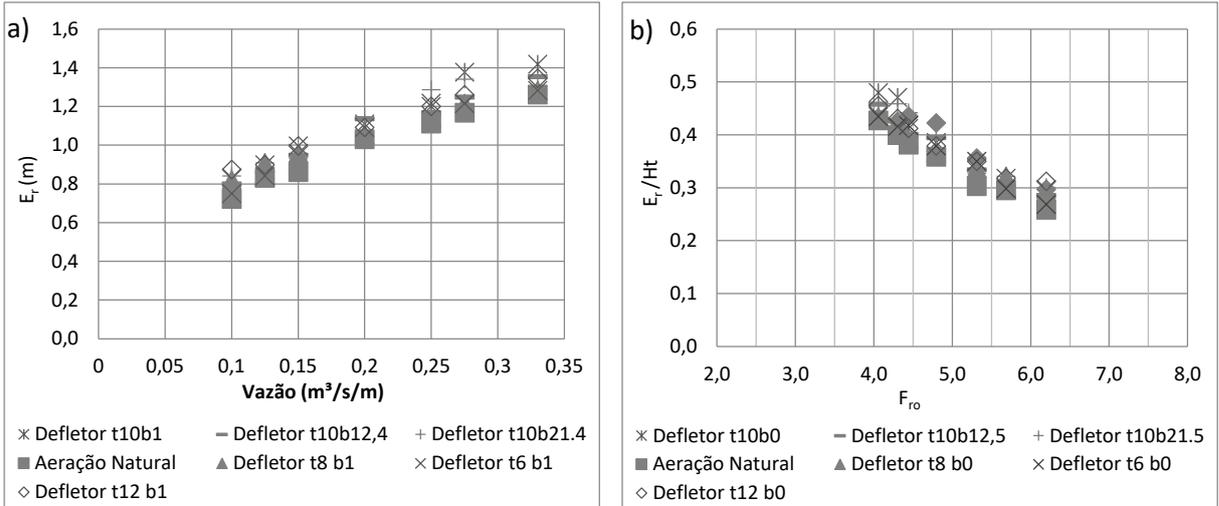


Figura 96 – energia na entrada do ressalto hidráulico, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.

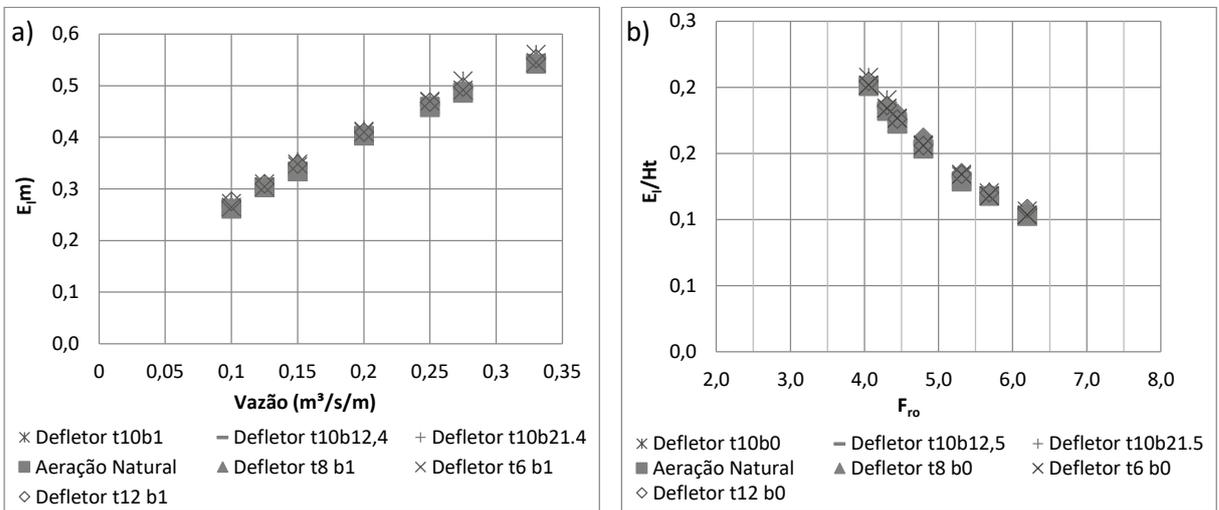


Figura 97 - Energia na saída do ressalto hidráulico, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.

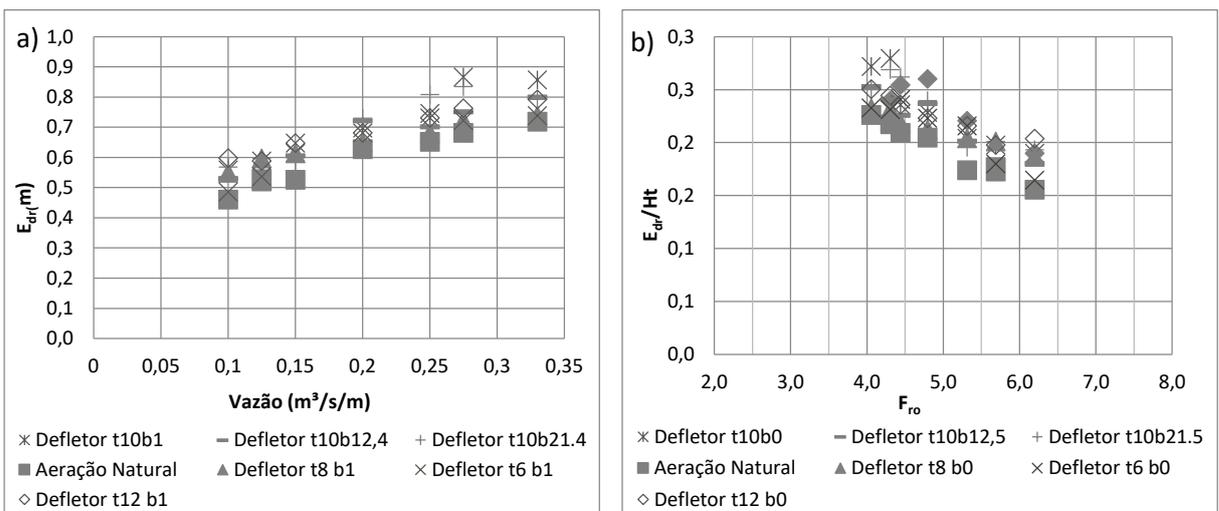


Figura 98 -- Energia dissipada no ressalto hidráulico, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.

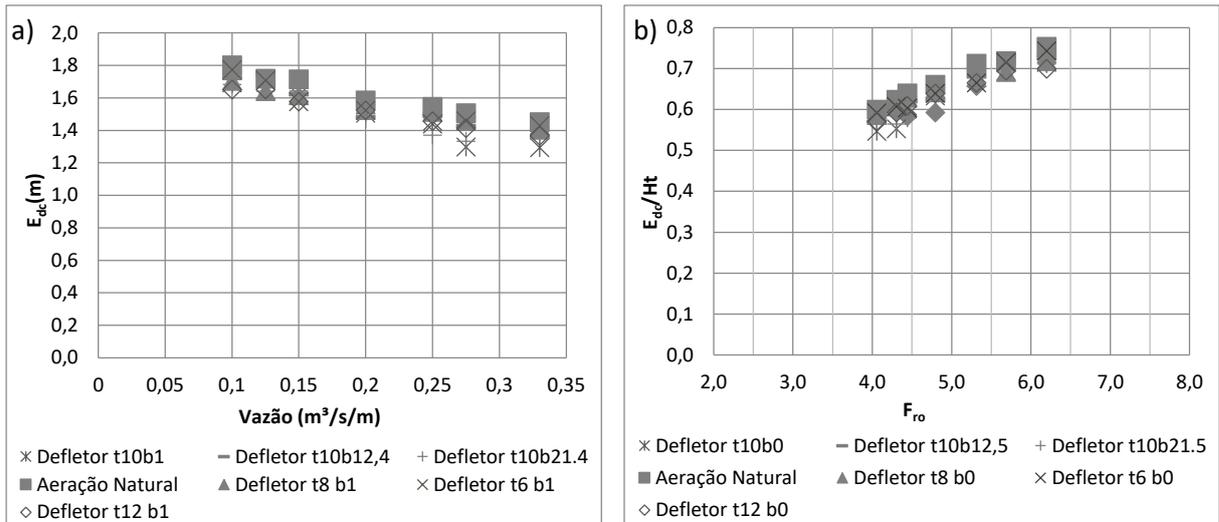


Figura 99 - Energia dissipada na calha do vertedouro, (a) em valores dimensionais e (b) em valores adimensionais.

A energia dissipada na calha foi calculada para o modelo LOH II em cada degrau a jusante do degrau de número 10, para todas as vazões ensaiadas. Os resultados obtidos para as situações de aeração induzida com os defletores t10 b0, e t10 b21,5 e com aeração natural estão apresentados na Figura 100, para a vazão de $0,300 m^3/s/m$, os demais encontram-se no apêndice S e apresentam comportamento semelhante. Assim como para a calha do modelo LOH I, os resultados referentes ao modelo LOH II indicam não haver diferença significativa na dissipação de energia proporcionada pela calha em degraus com aeração natural ou induzida. Destaca-se que a análise da dissipação de energia foi feita no pé da calha do modelo LOH I (32 degraus) e ao longo da calha do modelo LOH II (considerando 46 degraus) e, dessa forma, não é provável que o comprimento da calha seja um parâmetro importante para a verificação da influência da aeração induzida na dissipação de energia. Esse fato já era esperado devido à concentração de ar proporcionada pelos elementos aeradores atuar em um comprimento limitado da calha, já que a partir do ponto de início de aeração superficial, a quantidade de ar restante proveniente do aerados não ser mais significativa em relação à quantidade de ar inserida pela superfície do escoamento.

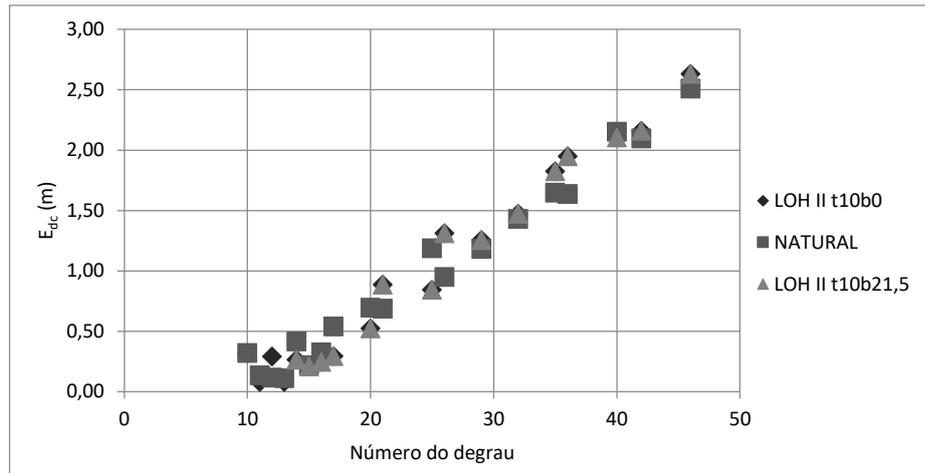


Figura 100 – Energia dissipada na calha para as situações de aeração induzida com o defletor t10 b0 e t10 b21,5 e com aeração natural para a vazão de $0,300\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

8.3.4 Comparação dos resultados

Os resultados obtidos para os dois modelos foram adimensionalizados e comparados com os dados de Zamora (2008) e Boes e Hager (2003) na Figura 101. Os dados referentes à presente pesquisa seguem a mesma tendência dos dados dos autores, podendo-se observar uma inclinação levemente mais acentuada. Os dados provenientes de cada modelo, comparados com os dados de Zamora (2008) e Boes e Hager (2003) podem ser visualizados, separadamente na Figura 102 (a e b). Os dados do LOH I foram obtidos através de diversas geometrias de defletor e vazões, apenas no pé do vertedouro (degrau 32). Na Figura 102a esses dados encontram-se separados por cores conforme a geometria de defletor referente. Os dados do modelo LOH II foram obtidos com dois diferentes defletores, para todas as vazões ensaiadas e em cada degrau da calha, então, encontram-se discriminados por cores por geometria do defletor e altura crítica do escoamento (Figura 102b). Percebe-se que os dados do LOH I correspondem à tendência dos dados de Zamora (2008) e Boes e hager (2003). Os dados referentes ao modelo LOH II apresentam uma inclinação levemente mais acentuada do que os dados dos autores. Um motivo para as diferenças entre os dados dos modelos pode ser explicado por efeitos de laboratório, já que as medições realizadas no modelo LOH I são mais simples e menos propensas a erros do que as realizadas no modelo LOH II.

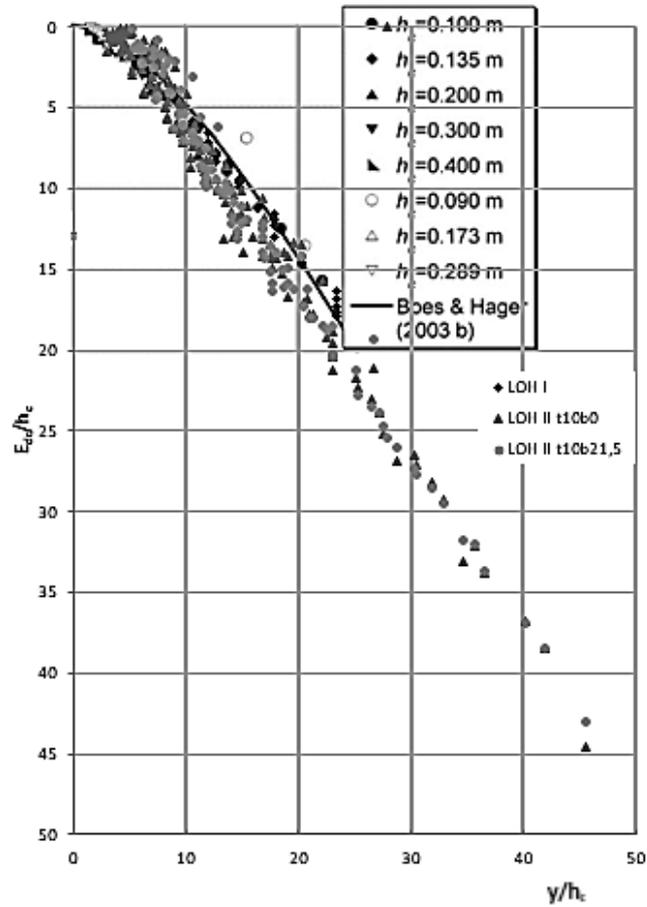


Figura 101 - Comparação dos dados de dissipação de energia obtidos no modelo LOH I e LOH II com os dados de Zamora

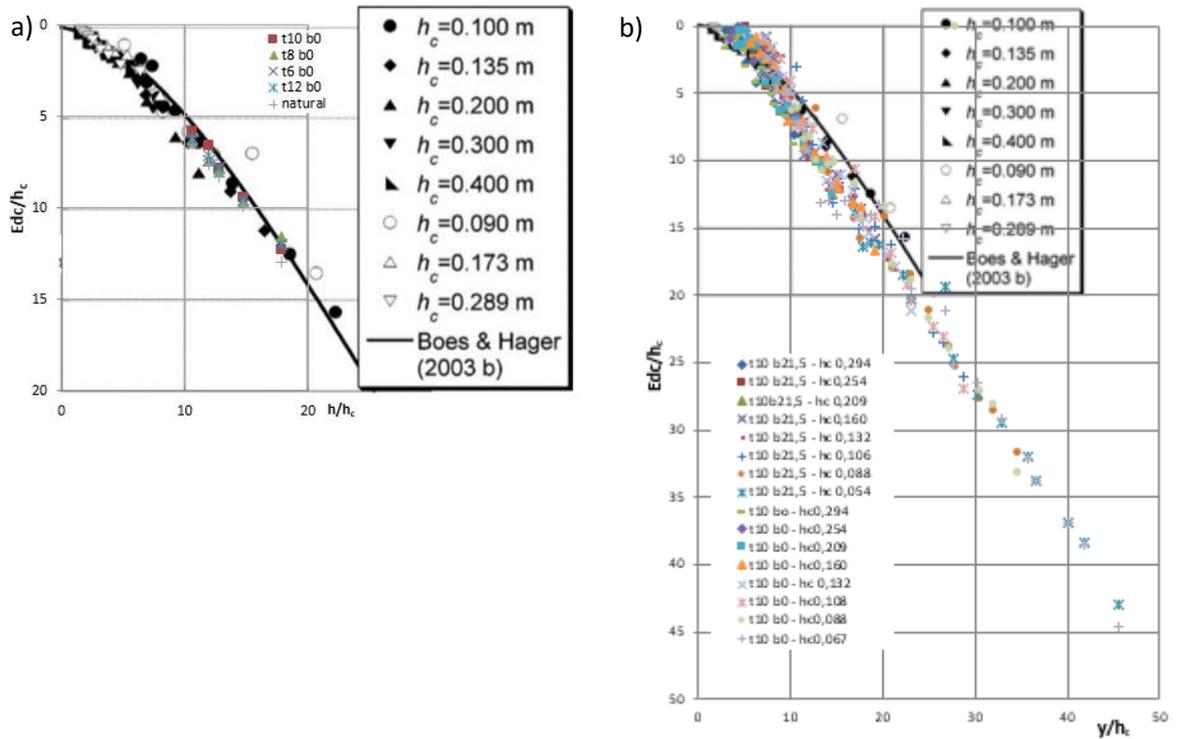


Figura 102 - Comparação dos dados de dissipação de energia obtidos com os dados de Zamora (2009 (a)) dados do modelo LOH I e (b) dados do modelo LOH II.

9 CONCLUSÕES

A presente tese teve por objetivo analisar características do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida por defletores em relação a:

- comportamento do escoamento;
- pressões junto às quinas dos degraus;
- demanda relativa de ar;
- concentração de ar no fundo do canal;
- dissipação de energia.

O trabalho foi desenvolvido através de modelagem física em três modelos localizados no Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/URGS) e no Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) e com diferentes geometrias de defletores. As conclusões observadas ao longo da pesquisa estão apresentadas a seguir.

9.1 COMPORTAMENTO DO ESCOAMENTO

O comportamento do escoamento sobre a calha em degraus com as vazões, geometrias de calha e de defletores estudados ocorreu de forma semelhante ao descrito por Novakoski et al. (2020) com um núcleo de blackwater que se estende pela calha e termina anteriormente ao início da aeração superior em função do desenvolvimento da camada limite, gerando, entre esses pontos, uma zona de transição. Esse comportamento é diferente de estudos como de Pfister (2006a), no qual o escoamento também apresenta um núcleo de blackwater que se estende pelos degraus, porém com início de aeração superior a montante do ponto de final da blackwater e diferente também de Terrier (2016) no qual o escoamento possui núcleo de blackwater apenas ao longo do jato, atingindo os degraus já de forma plenamente aerada. Algumas razões apontadas para essa diferença são os números de Froude do escoamento, a geometria do defletor e até mesmo a altura dos degraus da calha.

As características do escoamento analisadas foram: o ponto de impacto do jato, o ponto de final da blackwater e o ponto de início de aeração superficial. O ponto de impacto do jato foi o mesmo para os defletores t10b0 e t10b12,5 e mais para jusante para o defletor t10 b21,5. As demais posições observadas não sofreram influência significativa da geometria do defletor.

9.2 PRESSÕES JUNTO ÀS QUINAS DOS DEGRAUS

As pressões analisadas ao longo da presente pesquisa foram as pressões médias e extremas com probabilidade de não excedência de 0,1% e 99,9%. A análise foi conduzida separadamente para cada parâmetro estatístico e para os espelhos e patamares dos degraus. O estudo das pressões médias e das pressões extremas com 99,9% de probabilidade de não excedência mostrou que a diferença em relação ao escoamento com aeração natural ocorre no local do impacto do jato gerado no escoamento com aeração induzida. Nesse caso, há um pico de pressões positivas nesse ponto. O local onde o impacto do jato deixa de influenciar as pressões é dependente da geometria de defletor utilizada. A jusante desse local, não é mais possível identificar diferenças significantes entre as pressões observadas no escoamento com aeração induzida ou com aeração natural. A pressão média observada no patamar do primeiro degrau a jusante da abertura para entrada de ar foi utilizada para análise da subpressão. Como essa pressão foi nula (próxima da pressão atmosférica) concluiu-se que não há subpressão e, devido a isso, a formação do jato é influenciada apenas pela vazão de escoamento e pela geometria do defletor.

As pressões com 0,1% de não excedência nos espelhos dos degraus possuem maior importância na presente pesquisa devido à sua relação com a formação das bolhas no fenômeno da cavitação. Foi verificado um comportamento distinto dessas pressões considerando-se as menores e as maiores vazões ensaiadas. Em todas as vazões também foi verificado um pico, dessa vez de pressões negativas, no ponto de impacto do jato. A diferença observada está relacionada à magnitude desse pico em relação às demais pressões registradas. Para as menores vazões, o pico de pressões referentes ao impacto do jato representou as menores pressões observadas em toda a calha, já para as maiores vazões, pressões significativamente mais baixas são observadas a jusante do impacto do jato. A comparação com as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência em escoamento com aeração natural revelou uma diferença no ponto de impacto do jato, no qual o pico oriundo do escoamento com aeração induzida gerou pressões inferiores às pressões com aeração natural. Além disso, verificou-se uma tendência de leve atenuação nas mínimas pressões registradas para as pressões mais altas. Porém, destaca-se que essa atenuação não é significativa em termos de valores em modelo ou protótipo. Esse comportamento não era esperado, já que bibliografias como U.S. Corps of Engineers (1990) e Dong et al

(2007) mostraram uma significativa redução nas pressões e, conseqüentemente, no índice de cavitação no escoamento com inserção de ar. Um possível motivo apontado pela presente pesquisa para esse resultado é o fato de que os estudos dos autores citados foram conduzidos em conduto forçado. Nesse caso, o escoamento não possui espaço para aumentar sua lâmina d'água com a inserção de ar, já a presente pesquisa foi desenvolvida em uma calha em degraus com superfície livre e, dessa forma, o escoamento teve sua altura ampliada com a inserção de ar.

Como as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência desenvolvidas nos espelhos dos degraus para as maiores vazões estudadas estão associadas ao fenômeno da cavitação, foi desenvolvido um conjunto de equações lineares que permite a sua previsão.

9.3 DEMANDA RELATIVA DE AR

A entrada de ar para o interior do escoamento foi medida para todas as vazões e geometrias de defletor. Observou-se que maiores vazões correspondem à menores demandas relativas de ar e que o defletor t10 b21,5 correspondeu aos maiores valores. Entre os resultados obtidos para os defletores t10 b0 e t10 b12,5, não foram observadas diferenças significativas. Os dados resultantes da presente pesquisa foram comparados com os mesmos dados de Terrier (2016) e com a equação proposta pelo autor para sua previsão em função do comprimento de impacto do jato. Concluiu-se que a equação proposta pelo autor é válida para os dados da presente pesquisa.

9.4 CONCENTRAÇÃO DE AR NO FUNDO DO CANAL

A concentração de ar junto ao fundo da calha foi determinada de forma analítica para vazões a partir de 0,2 m³/s/m através de medições de pressões, demanda relativa de ar e níveis do escoamento, utilizando diferentes métodos de acordo com a região do escoamento. As concentrações de ar referentes ao defletor t10 b21,5 foram superiores às concentrações referentes ao defletor t10 b0, como era esperado devido aos resultados de demanda relativa de ar e também ao comprimento do jato formado, que também foi superior para o defletor de maior prolongamento (as concentrações para o defletor t1-b12,5 não foram calculadas devido a não terem sido constatadas diferenças significativas na demanda relativa de ar). Tomando-se como parâmetro os resultados de Peterka (1953) que indicaram que concentrações de ar acima de 2%

reduzem significativamente os danos por cavitação e que concentrações acima de 8% eliminam esses danos, verificou-se que todos os casos com o defletor t10 b0 atingiram pontos inferiores a 2% de concentração de ar no fundo, enquanto para o defletor t10 b21,5, apenas para a vazão de 0,5 m³/s/m essa situação foi observada. Para todas as situações e grande parte da calha, a partir de seu início, obteve concentrações de ar inferiores a 8%. Considerando-se a concentração de ar de 3%, indicada por Semenov e Lentyaev (1973) para proteção de concretos com 40 Mpa de resistência, também observou-se que apenas a vazão de 0,5 m³/s/m proporcionou condições de ocorrência de danos por cavitação.

Por fim, as concentrações de ar obtidas foram apresentadas em gráficos em função do comprimento da calha adimensionalizado pelo comprimento do jato.

9.5 ANÁLISE CONJUNTA DA CONCENTRAÇÃO DE AR NO FUNDO DO CANAL E DAS PRESSÕES COM 0,1% DE PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA NOS ESPELHOS DOS DEGRAUS.

A análise conjunta de $P_{0,1\%}$ e da concentração de ar no fundo da calha teve o intuito de verificar zonas com propensão ao efeito da cavitação devido ao desenvolvimento de pressões inferiores à pressão de vapor da água (considerada de -10,09 m.c.a.) e de concentrações de ar inferiores à 2%. Destaca-se que as pressões, inferiores à pressão de vapor da água são extrapoladas através das pressões medidas em modelo e servem como indicativo de ocorrência do fenômeno da cavitação, não ocorrendo na realidade em protótipo. Essa situação ocorreu em pequenas partes da calha para as vazões de 0,4 e 0,5 m³/s/m (aproximadamente 23 e 29 m³/s em protótipo) para a aeração com o defletor t10 b0 e apenas para a vazão de 0,5 m³/s/m para a situação com defletor t10 b21,5. Concluindo-se que, utilizando –se o defletor t10 b21,5, poderia se utilizar a estrutura para vazões de até cerca de 23 m³/s/m prevendo que os danos contra cavitação seriam significativamente reduzidos. Considerando-se que para essa situação com aeração natural, ocorreriam danos por cavitação devido à existência de uma zona com concentrações de ar junto ao fundo inferiores a 3% e pressões inferiores à pressão de vapor da água, conclui-se que o sistema aerador é capaz de ampliar a faixa de vazões escoadas pelo vertedouro reduzindo o risco de ocorrência de danos por cavitação.

9.6 DISSIPACÃO DE ENERGIA

A dissipação de energia foi estimada para escoamentos com aeração induzida com diferentes geometrias de defletor através de análises de pressões na bacia de dissipação junto ao pé do vertedouro, comprimento do ressalto hidráulico e balanço de energia. A análise demonstrou que a dissipação de energia não é alterada com a indução da aeração no escoamento. Esse resultado vai ao encontro dos resultados de Zamora et al. (2008). Embora o aumento da concentração de ar em escoamentos em geral tender a diminuir a dissipação de energia devido à redução do fator de resistência do escoamento, a não influência da inserção de ar na dissipação de energia no caso da presente pesquisa pode ser explicada devido à concentração de ar adicionada pela aeração induzida ser reduzida. Essa hipótese é justificada com base nos dados de Wood (1991) que indica que o fator de resistência do escoamento é reduzido com concentrações médias de ar superiores a 30% e que tem valor aproximadamente constante para concentrações de ar inferiores a esse valor.

9.7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As análises realizadas ao longo do presente trabalho permitiram uma análise conjunta do desenvolvimento das pressões e das concentrações de ar junto ao fundo de uma calha em degraus com aeração induzida. A seguir são sugeridas algumas recomendações para trabalhos futuros de forma a complementar a pesquisa desenvolvida:

- realizar medições de concentração de ar com equipamentos adequados para confirmar as estimativas realizadas no presente trabalho, uma vez que foram determinadas através de estimativas teóricas;
- variar da posição do defletor ao longo da calha (para jusante), permitindo a análise do escoamento com diferentes números de Froude;
- verificar as vazões entre 23 e 29 m³/s/m a fim de verificar, mais especificamente, a vazão limite para incipiência de danos por cavitação.
- ampliar a faixa de vazões ensaiadas;
- testar outros tamanhos de defletores.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADOR, A. T. **Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado**. 2005. 204 f. Tese (Doctorado en Ingeniería) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2005.
- ARANTES, E. J. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia (Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- ARNDT, R. E. A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. **Annual Review of Fluid Mechanics**, v. 13, p.273-326, 1981.
- BOES, R. M.; HAGER, W. H. Two-phase flow characteristics of stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 9, p.661-670. 2003.
- BORSARI, R. D. A aeração induzida nos escoamentos rápidos à superfície livre. In: **Curso sobre a semelhança e modelação física em hidráulica**. Belo Horizonte, 1989, cap 4, p. 105-144.
- CANELLAS, A. V. B.; PRIEBE, P dos S.; FERLA, R.; NOVAKOSKI, C. K; REGINATTO, A. C.; PRÁ, D. M.; SANAGIOTTO, D. G.; ENDRES, L. A. M; MARQUES, M. G. Nova proposta de análise adimensional da distribuição de pressões ao longo da calha de um vertedouro em degraus. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 22, 2017. Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, 2017. p. 1-8.
- CANELLAS, A. V. B. **Pressões atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros**. 2020. 186 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Sanemanto Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2020.
- CHANSON, H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 2, p. 213-218, 1994a.
- CHANSON, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, v. 21, n. 3, p. 445-460, 1994b.
- CHANSON, H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. **Dam Engineering**, v. 11, n. 4, p. 205-242, 2001.
- CHANSON, H. Turbulent air–water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, n. 9, p.125-142. 2009.
- CHANSON, H.; TOMBES, L. Air-water flows down stepped chutes: turbulence and flow structure observations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, p. 1737-1761. 2002.
- CHOW, V. T. **Open-Channel Hydraulics**. Nova York: McGraw-Hill Book Company, INC., 1959.
- CONTERATO, E. **Escoamento sobre vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H: Caracterização das pressões e condições de aeração** (2011). 69 f. Trabalho de diplomação

(Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CONTERATO, E. **Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus**. 2014. 156 f. (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, 2014.

DAI PRÁ, M. **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:1H**. 2004. 134 f. Dissertação. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DONG, Z.; CHEN, L.; JU, W. Cavitation characteristics of high velocity flow with and without aeration on the order of 50 m/s. **Journal of Hydrodynamics**, v. 19, n. 4. p. 429-433, 2007.

DONG, Z.; WANG, J.; VETSCH, D. F.; BOES, R. M; TAN, G. Numerical simulation of air-water two phase flow on stepped spillways behind x-shaped flaring gate piers under very high unit discharge. **Water**, v. 11, p. 1-21, 2019.

ELETROBRÁS – CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas. Disponível em:< <http://eletrobras.com/pt/Paginas/Manuais-e-Diretrizes-para-Estudios-e-Projetos.aspx>>. Acesso em 16 fev. 2019.

FALVEY, H. T. **Cavitation in chutes and spillways**. Denver: Bureau of Reclamation, 1990.

FERLA, R; NOVAKOSKI, C. K.; PRIEBE, P. dos S.; DAI PRÁ, M.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D. Stepped spillways with aerators: hydrodynamic pressures and air entrainment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.26, 2021.

FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Cavitation potential of flow on stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 6, p. 630-636, 2013.

FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Closure to “Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways” by K. Warren Frizell, Floriana M. Renna, and Jorge Matos. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 141, n. 8, 2015.

GAL’PERIN, R. S.; KUZ’MIN, K. K.; NOVIKOVA, I. S.; OSKOLKOV, A. G.; SEMENKOV, V. M.; TSEDROV, G. N. Cavitation in elements of hydraulic structures and methods of controlling it. In: *Hydrotechnical Construction*, 5, 1971, 726-732.

GASKIN, S. J. Air demand for a ramp-offset aerator as a function of spillway slope, ramp angle and Froude number. In: IAHR CONGRESS, 30, 2003, Thessaloniki. **Anais...** Thessalonike: IAHR, 2003. Não Paginado.

GOMES, J. F. **Campo de pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H**. 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2006.

INTERNATIONAL COMMITTEE ON LARGE DAMS. ICOLD. **Mains brazilian dams III: Design Construction and Performance**. 2009, 436p. CIGB/ICOLD.

KOBUS, H. Local air entrainment and detrainment. In: Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, 1984. Stuttgart. **Anais...** Stuttgart, 1984. p 1-10.

KOKPINAR, M. A.; GOGUS, M. High speed jet flows over spillway aerators. **Canadian Journal of Civil Engineering**, Canada, v. 29, p. 885-898, 2002.

KOSCHITZKY, H. P.; WESTRICH, B.; KOBUS, H. Effects of model configuration, flow conditions and scale in modelling spillway aeration grooves. In: Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures, 1984. Stuttgart. **Anais...** Stuttgart, 1984. p 1-5.

LOPARDO, R. A.; De Lio, J. C.; Vernet, G. F. Physical Modeling on Cavitation Tendency for Macroturbulence of hydraulic Jump. In: Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures, 1982. Coventry. **Anais...** Coventry, 1982, 109-121.

LOPARDO, R. A. Modelacion física de flujo macroturbulento em estruturas hidráulicas. In: Congresso Chileno de Ingenieria Hidraulica, 13, 1996. Santiago. **Anais...** Santiago, 1996, 5-20.

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

MATOS, J. S. G. **O arejamento como medida de proteção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas**. 1990. 188 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1990.

MATOS, J. S. G. **Emulsioneamento de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus**. 1999. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1999.

MATOS, J. (2000). “**Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams**”. Proceedings of the International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways, Eds. H.E. Minor and W.H. Hager, Balkema, pp. 187-194.

MATOS, J. Discussion of “Hydraulic design of stepped spillways” by Robert M. Boes and Willi H. Hager. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 6, p.521-524. 2005.

MATOS, J.; MEIRELES, I. Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: engineering challenges, labyrinths of research. In: International Symposium on Hydraulic Structures–Hydraulic Structures and Society: Engineering Challenges and Extremes, 5, 2014. Brisbane. **Anais...** Brisbane, 2014, 127-134.

MAY, R. W. P. **spacing of aerators for spillways: Development of a 2-D numerical model**. HR Report SR 311. 1992.

MEIRELES, I; RENNA, F.; MATOS, J. Skimming, nonaerated flow on stepped spillways over roller compacted concrete dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 10, p.870-877. 2012.

MOJTABA, S.; MOUSAVI, J. H.; SHAFEI, B. M.; MASJEDI, A.; ALI, K. H. Experimental study of effect of installing deflector on replacement of inception point of air entrainment in stepped spillways. **Journal of Scientific Research and Development**, v. 4, p. 11-16. 2015.

NOVAKOSKI, C. K. **Análise da distribuição longitudinal das pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de vertedouro em degraus**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

NOVAKOSKI, C. K.; CONTERATO, E. MARQUES, M.; TEIXEIRA, E. D.; LIMA, G. A.; MEES, A. Macro-turbulent characteristics of pressures in hydraulic jump formed downstream of a stepped spillway. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, 2017a.

NOVAKOSKI, C. K.; HAMPE, R. F.; CONTERATO, E. MARQUES, M.; TEIXEIRA, E. D. Longitudinal distribution of extreme pressures in a hydraulic jump downstream of a stepped spillway. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 22, n. 42. 2017b.

NOVAKOSKI, C. K.; PRIEBE, P. S.; TEIXEIRA, E. D.; REGINATTO, A. C.; CONTERATO, E.; CASTIGLIO, G. S.; CANELLAS, A. B.; DESESSARDS, F. P.; MARQUES, M.G. Comparação da dissipação de energia ao longo de uma calha em degraus com aeração natural e aeração forçada. In: Congresso Latino Americano de Hidráulica, 28, 2018. Buenos Aires. **Anais...** Buenos Aires: IAHR, 2018. Não paginado.

NOVAKOSKI, C. K.; FERLA, F.; DAÍ PRÁ, M; CANELLAS, A. V. B.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D. Stepped spillway with pre-aeration by a deflector: flow characteristics. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, 2020.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Flow characteristics of skimming flows in stepped channels. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 130, n. 9, p.860-869, 2004.

OSMAR, F. M. **Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2016. 93f. 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, 2016.

PEGRAM, G. S.; OFFICER, A. K.; MOTTRAM, S. R. Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, p. 500-510, 1999.

PETERKA, A. J. The effect of entrained air on cavitation pitting. In: Minnesota International Hydraulic Convention, 1953, Minneapolis. **Resumos...** Minneapolis, Bureau of Reclamation, 1953. Não paginado.

PFISTER, M. **Schussrinnenbelüfter: Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur. Mitteilungen** 203, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), H.-E. Minor, Hrsg. ETH Zürich, 2008.

PFISTER, M. Self-entrainment of air on stepped spillways. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 37, n. 2, p.99-107, 2011.

PFISTER, M.; BOES, R. M. Discussion of “Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams” by Inês Meireles, Florian Renna, Jorge Matos, and Fabián Bombardelli. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 10, out. 2014.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, v. 26, p. 291-298. 2014.

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. E. Bottom aeration of stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, p. 850-853. 2006a.p

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. E. Stepped chutes: pre-aeration and spray reduction. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 32, p. 269-284. 2006b.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute aerators I: Air transport characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, p. 352-359. 2010a.

PFISTER, A. J.; HAGER, W. H. Chute aerators II: Hydraulic Design. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 136, p. 360-367. 2010b.

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows:scale Effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, v. 26, n. 2, p.291-298. 2014.

PRIEBE, P. dos S. **Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus**. 2020. 241 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

POVH, P. H; TANIGUCHI, E. R.; OTA, J. J. Início da aeração e pressões ao longo de vertedouros em degraus. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 9, n. 1, p. 97-111. 2004.

REBOLLO, J. J.; LÓPEZ, D.; GARROTE, L.; RAMOS, T.; DÍAZ, R.; HERRERO, R. Experimental analysis of the influence of aeration in the energy dissipation of supercritical channel flows. **Water**, v. 11, n. 576, p. 1-14. 2019.

RUTSCHMANN, P.; HAGER, W. H. Air entrainment by spillway aerators. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 6, p. 765-782. 1990.

RUSSEL; S. O; SHEEHAN, G. J. Effect of entrained air on cavitation damage. **Journal of Canadian Engineering**, v. 1, n.97. p. 97-106. 1974

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

SÁNCHEZ JUNY, M. **Comportamiento hidráulico de los aviviaderos escalonados em presas de hormigón compactado**: análisis del campo de presiones. (2001). Tese (Doutorado em engenharia civil) – Programa de Doctorado em Ingenieria Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2001.

SÁNCHEZ JUNY, M.; BLADÉ, E.; DOLZ, J. Pressures on a stepped spillway. **Journal of hydraulic Research**, v. 45, n. 4 p. 505-511. 2007.

SÁNCHEZ JUNY, M.; BLADÉ, E.; DOLZ, J. Analysis of pressures on a stepped spillway. **Journal of hydraulic Research**, v. 46, n. 3 p. 410-414. 2008.

SEMENKOV, V. M.; LENTYAEV, L. D. Spillway with nappe aeration. **Hydrotechnical Construction**, v. 7, p.436-441, 1973.

SIMÕES, A. L. A. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: Metodologias adimensionais para pré dimensionamento**. 2008. 258 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SIMÕES, A. L. A. **Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas**. 2012. 528 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

STEPHENSON, D. Energy dissipation down stepped spillways. **Water Power & Dam Construction**. 1991. Sutton, v.43, n°9, p.27-30, September 1991.

STRAUB, L. G.; ANDESON, A. G. Experiments on self-aerated flow in open channels. **Journal of the Hydraulic Division**, v. 84, n. 7, 1958.

TAKAHASHI, M.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Effect of Reynolds number on characteristics of skimming flows in stepped channels. In: IAHR Congress, 31, 2005, Seou. **Anais...** Seou, IAHR, 2005. p. 1-16.

TEIXEIRA, E. D. **Previsão dos Valores de Pressão Junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. 2003. 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2003

TEIXEIRA, E. D. **Efeito de escala na previsão dos valores extremos de pressão junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. 2008. 293 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2008.

TERRIER, S. **Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features**. 2016. 317 f. Tese – Laboratory of Hydraulic Constructions, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2016.

TOZZI, M. J. **Caracterização/ comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus**. (1992). 302f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS, Hydraulic Design of Spillways. Washington, 1990.

VOLKART, P. **Air slots for flow aeration: Determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway**, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zurich, Switzerland, No. 66. 1983.

VOLKART, P.; RUTSCHMANN, P. **Air entrainment devices (air slots)**, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zurich, Switzerland, No. 72. 1984.

WANG, S. DONG-MEI, H. WANG, C. Aerator of stepped chute in Murum Hydropower statio. In: 2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering. 2012, Nanjing. **Anais...** Nanjing: Procedia Engineering, 2012, p. 803-807.

WOOD, I. R. Free surface air entrainment on spillways. In: WOOD, I. R. (Ed.). **Air entrainment in free-surface flows**. Netherlands: A.A. Baikema, 1991. p. 55-84.

ZAMORA, Anina Schiess et al. Hydraulic Performance of Step Aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 2, p.127-134, fev. 2008.

ZHANG, j; CHEN, J; WANG, Y. Experimental study on time-averaged pressures in stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, v.37, n.41, p. 236-240. 2012.

ZHANG, J. CHANSON, H, WANG, Y. Total pressure fluctuationd and two-phase flow turbulence in self-aerated stepped chute flows. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 52, p.8-20. 2016.

APENDICE A – MODELOS FÍSICOS REDUZIDOS

B.1. LAHE

O modelo LAHE consiste em um vertedouro em degraus com ogiva creager na escala 1:10 construído em concreto, com inclinação de 1V:0,75H e 20 degraus com altura de 0,9 cm. Assim como no modelo LOH II, a aeração é induzida através de um defletor entre a ogiva e o primeiro degrau e uma câmara de ar no espelho do primeiro degrau construídos em acrílico e móveis. A caixa da câmara de ar possui uma abertura de 100 mm de diâmetro para que uma tubulação de PVC possa ser instalada. A vazão máxima escoada no modelo é de cerca de 410 l/s. A Figura 103 mostra o modelo LAHE e a Figura 104 apresenta uma foto e um esquema do sistema de indução de ar no modelo. A Figura 105 mostra a abertura no espelho de primeiro degrau para permitir a entrada de ar ao escoamento. Assim como no modelo LOH II, a caixa da câmara de ar tem a função de tranquilização do escoamento de ar. A tranquilização do escoamento de água é apresentada na Figura 106 em sua fase de construção. O sistema de bombeamento de água para o reservatório superior que conduza a água ao modelo por gravidade se dá através de seis conjuntos motor-bombas com potência de 40 e 50 CV. As vazões requeridas são ajustadas através de um registro de pressão e medidas por um medidor de vazão presente na tubulação responsável pela condução da água até o modelo (Figura 107).

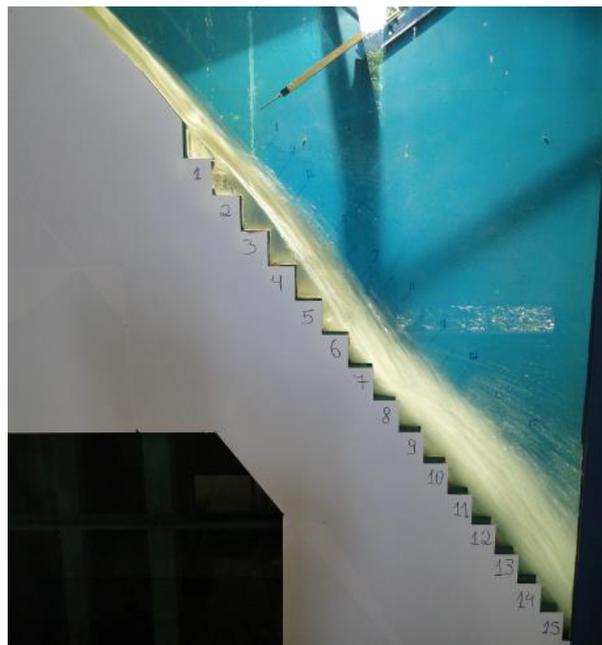


Figura 103 – Foto do modelo LAHE

a)



b)

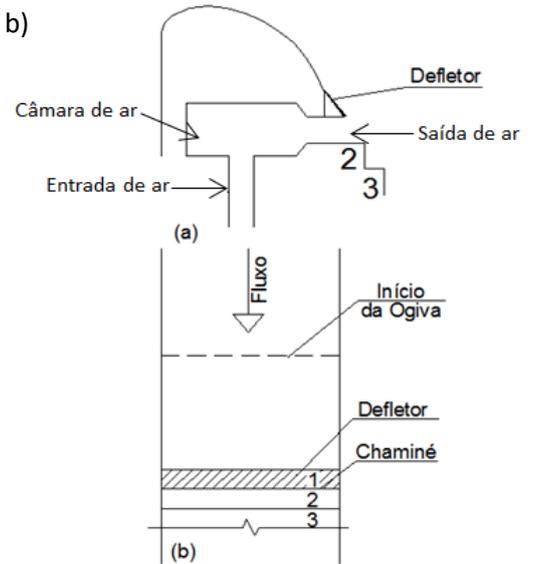


Figura 104 - sistema de indução de ar no modelo LAHE, (a) foto e (b) esquema



Figura 105 – Abertura no espelho do primeiro degrau com o objetivo de permitir a entrada de ar para o escoamento.



Figura 106 – montagem do sistema de tranquilização do escoamento.



Figura 107 – Sistema de abastecimento de água do modelo LAHE.

As tomadas de pressão foram colocadas próximas às quinas dos degraus, no eixo central da calha, como mostra a Figura 108. As pressões podem ser medidas através de piezômetros ou de transdutores de pressão.

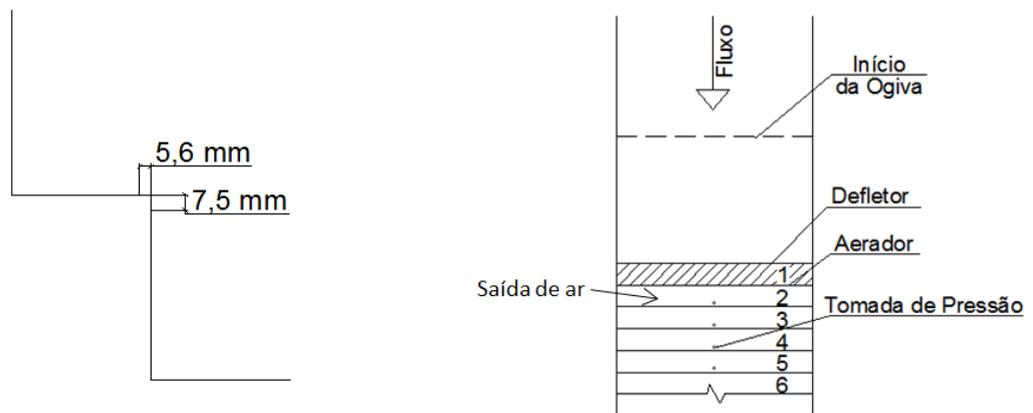


Figura 108 – Posição das tomadas de pressão no modelo LAHE.

B.2. LOH I

O modelo físico LOH I, construído em metal, consiste em um vertedouro em degraus com ogiva do tipo Creager, seguido de bacia de dissipação, calha com inclinação de 1V:0,75H e 32 degraus com 0,06 m de altura (Figura 109). No pé do vertedouro existe uma bacia de dissipação do tipo I do USBR (United States Bureau of Reclamation) que permite a formação de um ressalto hidráulico. O canal possui 8 m de comprimento sendo que, destes, 5 m possuem parede em acrílico para visualização do escoamento, assim como as paredes localizadas nas laterais da calha do vertedouro em degraus. A vazão máxima possível de escoamento é de cerca de $0,333 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ devido a limitações construtivas do canal a montante do vertedouro em degraus. O escoamento na bacia de dissipação pode ter seu nível ajustado através de uma comporta tipo veneziana e de um tubo piezométrico com escala graduada, o que permite o posicionamento desejado do ressalto hidráulico. O mesmo modelo já foi utilizado para trabalhos como os de Conterato (2014), Novakoski et al (2017a) e Novakoski et al (2017b), sendo que, para a presente pesquisa, foi adaptado para a introdução de ar no escoamento (aeração induzida). O sistema de aeração induzida é composto por um aerador tipo defletor, construído em acrílico, entre a ogiva e o primeiro degrau e fornecimento de ar através de uma câmara de ar acoplada ao espelho do primeiro degrau, ambos móveis. A câmara de ar, que também possui a função de tranquilização do escoamento de ar foi adaptada na parte interior da ogiva

do vertedouro, já existente, através de uma tampa de acrílico. Na tampa, foi acoplado um trecho de tubulação de PVC de 180 cm de comprimento e 100 mm de diâmetro com um cone conectado ao seu final, essa tubulação é móvel e pode ser retirada ou substituída caso necessário. A Figura 110 apresenta uma foto e um esquema do sistema de aeração induzida no modelo e a Figura 111 apresenta uma foto da abertura no primeiro degrau, por onde é dado o fornecimento de ar. A tranquilização do escoamento de água também foi garantida, como apresentado na Figura 112. O sistema de fornecimento de água para o reservatório do modelo consiste em três bombas de 75, 50 e 25 CV que podem ser utilizadas individualmente ou combinadas conforme a vazão requerida. De acordo com a combinação determinada, a tubulação responsável pela condução da água é ajustada através de registros de gaveta.



Figura 109 – Foto do modelo LOH I.

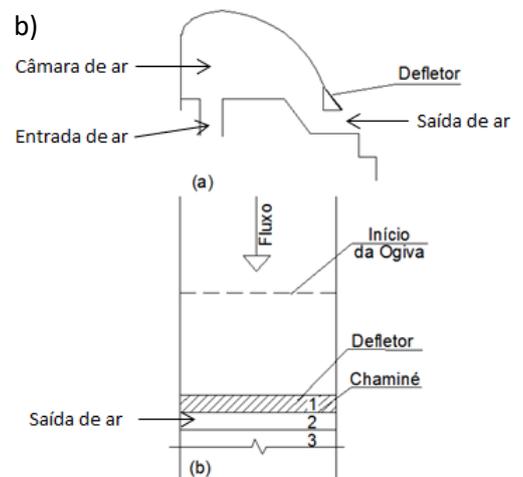


Figura 110 – Sistema de indução de ar no modelo LOH I, (a) foto e (b) esquema.



Figura 111 – foto da abertura do primeiro degrau para permitir a entrada de ar para o interior do escoamento.



Figura 112 – Tranquilização do escoamento no modelo LOH I.

Para os ensaios, foram utilizadas 6 diferentes geometrias de defletores. Três deles foram os mesmos definidos para utilização no modelo LOH II (t10 b0, t10 b21,5 e t10 b12,5). Os demais defletores utilizados (com 6, 8 e 14 mm de altura e sem prolongamentos, como mostra a Figura 113) foram selecionados com a premissa de que com maiores variações na geometria do defletor, pode-se ter uma melhor compreensão do fenômeno. Também foi realizado um ensaio com aeração natural (sem presença de defletores) para servir de comparação aos resultados obtidos. Para cada geometria de defletor testada e para a condição de aeração natural, foram testadas as vazões de 0,1, 0,125, 0,15, 0,2, 0,25, 0,275 e 0,33 m³/s/m o que corresponde a números de Froude na entrada do ressalto hidráulico (Fr_r) entre a faixa de 5,3 e 7,5 (ressalto hidráulico estável) e números de Froude de aproximação (Fr_o) entre 4,0 e 6,2. Durante os ensaios, a comporta de jusante era ajustada para cada vazão de forma a permitir a formação de um ressalto hidráulico livre.

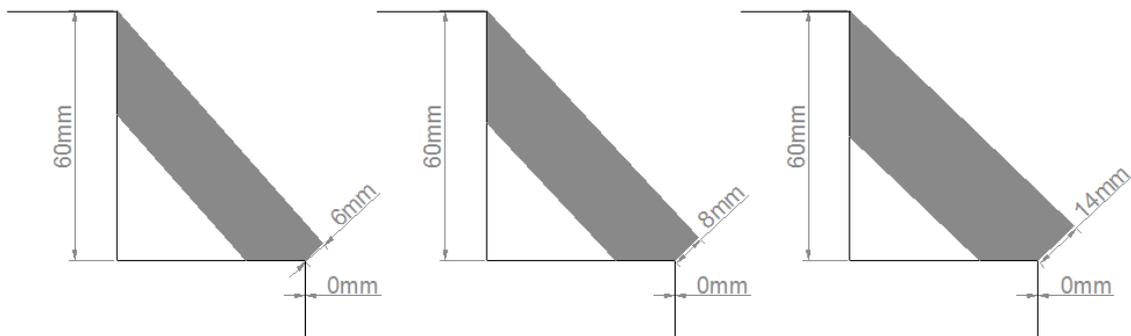


Figura 113 – defletores utilizados no modelo LOH I

B.3. LOH II

O modelo físico LOH II consiste em um vertedouro em degraus com ogiva Creager, construído em metal. O modelo possui 62 degraus de 0,06 cm de altura e inclinação de 1V:0,75H. As paredes do modelo foram construídas em acrílico para permitir a visualização do escoamento cuja maior vazão possível de escoamento é de cerca de 0,500 m³/s/m, visando evitar o extravasamento do canal. A aeração é induzida através de um defletor localizado entre a ogiva e o primeiro degrau e o fornecimento de ar é dado por uma câmara de ar instalada no espelho do primeiro degrau, o qual é aberto em toda sua seção transversal. Tanto o defletor como a câmara de ar são construídos em acrílico. A Figura 114 apresenta uma foto do modelo, a Figura 115 apresenta uma foto e um esquema do sistema de indução de ar para o interior do escoamento e a Figura 116 mostra uma foto da abertura para fornecimento de ar, localizada no espelho do primeiro degrau. A caixa da câmara de ar tem o objetivo de tranquilizar o escoamento de ar e possui uma abertura de diâmetro de 75 mm com um flange de 15 cm onde pode ser instalada de uma tubulação de PVC. A tubulação de PVC instalada possui diâmetro interno de 69 mm. A tranquilização do escoamento de água, Figura 117, foi garantida através de uma camada de tijolos furados com o objetivo de assegurar a bidimensionalidade do escoamento.

As características geométricas dos diferentes defletores testados encontram-se na Figura 118. Essas características foram determinadas de acordo com os resultados dos ensaios preliminares cujos resultados encontram-se no Apêndice B.

O mesmo sistema de abastecimento conduz a água até os modelos LOH II e LOH I. A tubulação que conduzirá a água para um ou outro modelo é ajustada através de registros como indicado na Figura 119. O controle das vazões de água é feito através de medidores de vazão presentes em cada trecho da tubulação e de inversores de frequência conectados às bombas e manipulados manualmente.



Figura 114 – Foto do modelo físico utilizado para os ensaios

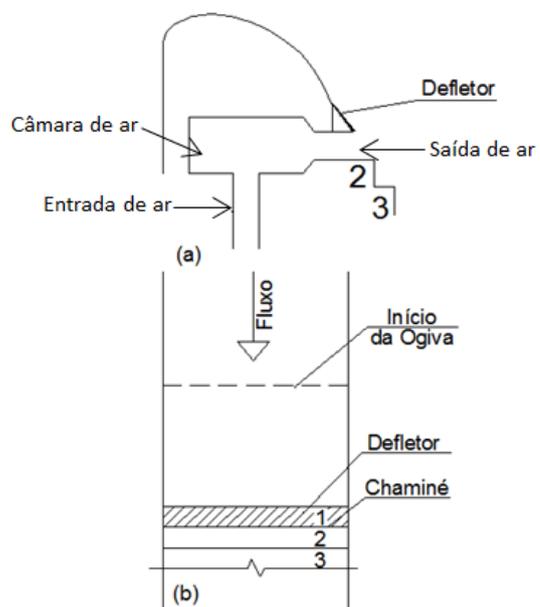


Figura 115 – Foto e esquema do sistema de indução de ar no modelo LOH II.



Figura 116 – foto da abertura no espelho do degrau para fornecimento de ar no modelo LOH II.



Figura 117 – Tranquilização do escoamento.

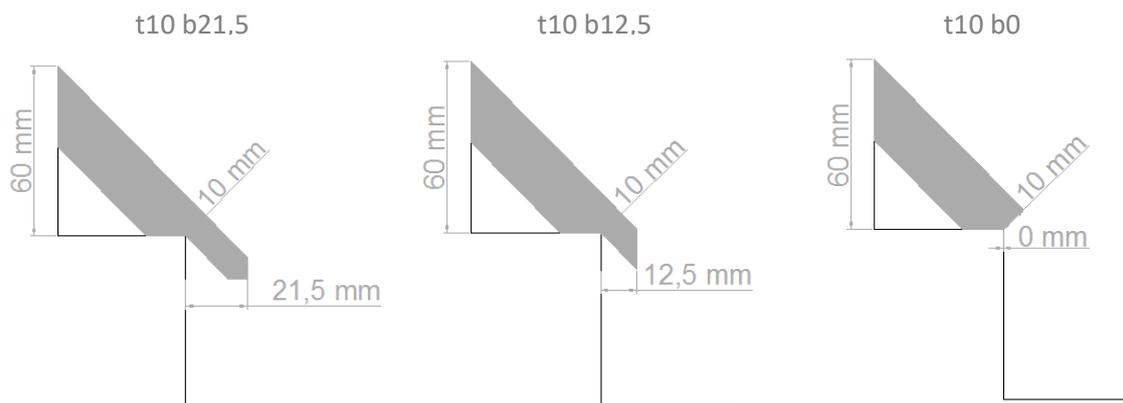


Figura 118 – Terceira opção de defletores sugeridos para ensaios com aeração induzida no modelo LOH II.



Figura 119 – Sistema de bombeamento do laboratório de obras hidráulicas.

As esperas para tomadas de pressão nos degraus estão localizadas próximo às suas quinas no eixo central da calha (Figura 120). As medições podem ser realizadas com transdutores de pressão ou piezômetros. Para cada defletor testado, foram ensaiadas as vazões de 0,054, 0,082, 0,108, 0,150, 0,200, 0,300, 0,400, 0,500 m³/s/m.

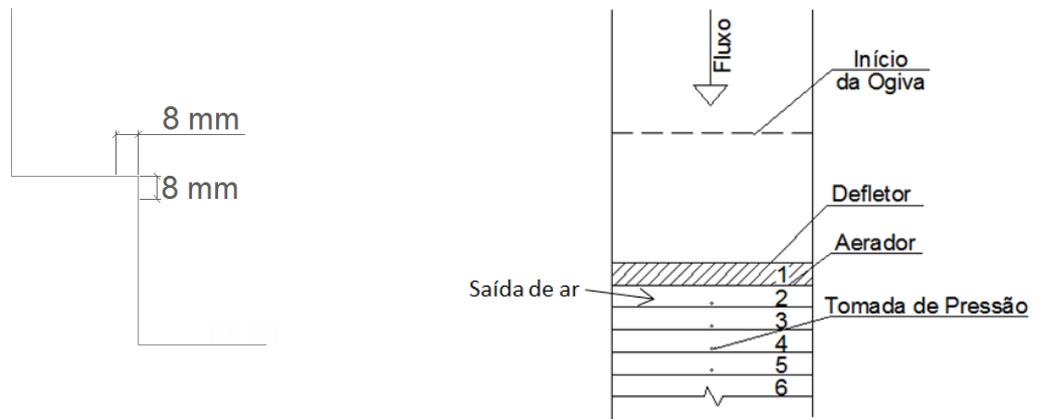


Figura 120 – Posição das tomadas de pressão nos degraus do modelo LOH II

APENDICE B – ENSAIOS PRELIMINARES PARA DEFINIÇÃO DAS GEOMETRIAS DOS DEFLETORES A SEREM TESTADOS

A realização dos ensaios preliminares e os resultados obtidos foram determinantes para o entendimento inicial dos fenômenos envolvidos na presente pesquisa e para o aprimoramento da metodologia dos ensaios principais que foram responsáveis pela obtenção dos dados cuja análise pretende cumprir com os objetivos propostos.

Como o defletor é instalado entre o final da ogiva e o primeiro degrau do vertedouro, seu comprimento é fixo e a angulação depende da altura “t” (Figura 121) que foi variada nos ensaios. Inicialmente, foram definidas algumas geometrias de defletores para início dos testes. Conforme os resultados obtidos, as geometrias foram sendo modificadas até a definição das que foram utilizadas nos ensaios principais. Para a definição dos defletores iniciais para os ensaios preliminares, foi considerado que os degraus presentes na calha são responsáveis pela antecipação do ponto de início de aeração. Como se espera que o sistema de aeração proposto venha a contribuir com a função já realizada pela macrorrugosidade dos degraus, foram escolhidos defletores com pequena altura “t”. Esperava-se que, dessa forma, o jato formado na passagem pelo defletor não lançasse o escoamento para jusante de forma que uma longa extensão da calha estivesse abaixo do jato sem contato com o escoamento. Deve-se salientar que, como os modelos LOH II e LAHE possuem diferentes escalas, todas as características determinadas devem respeitar a particularidade de cada modelo. Dessa forma, os primeiros defletores determinados para ensaio foram de altura de 2, 4 e 6 mm no modelo LOH II, correspondendo a 3, 6 e 9 mm no modelo LAHE. A Figura 122 e a Figura 123 apresentam esquemas dos defletores que foram determinados, primeiramente, para utilização no modelo LOH II e LAHE, respectivamente.

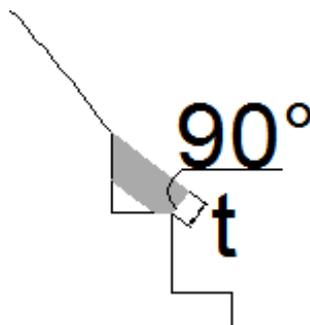


Figura 121 – Instalação e características dos defletores

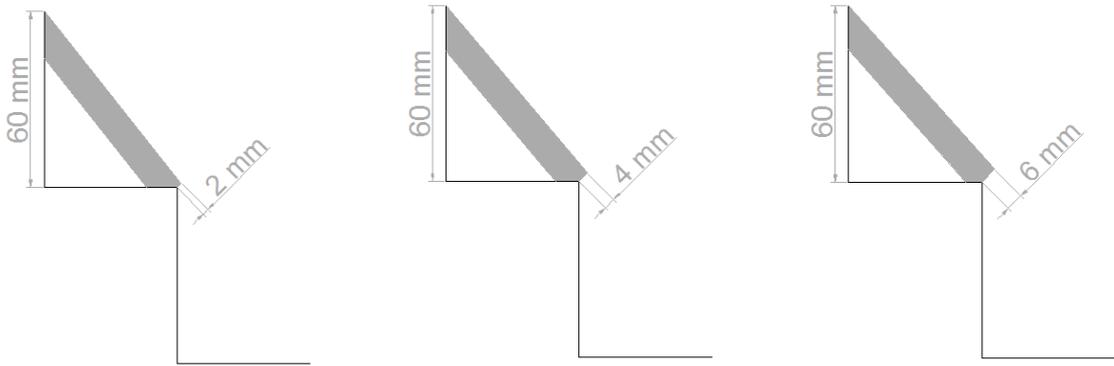


Figura 122 – Defletores determinados para o modelo LOH II

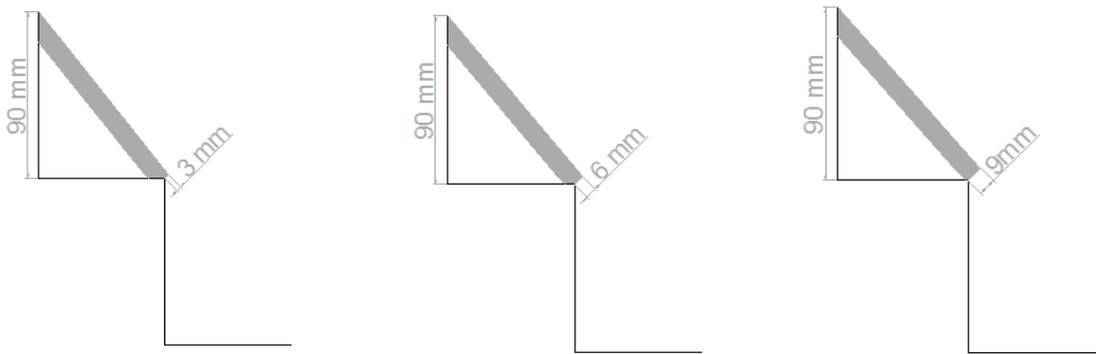


Figura 123 – Defletores determinados para o modelo LAHE

Os transdutores utilizados no modelo LAHE são da marca ZURICH, modelo PSI.420, com precisão de 0,1%F.E. Os transdutores, depois de devidamente aferidos, são instalados no modelo LAHE de forma similar ao modelo LOH II, com mangueiras de aproximadamente 20 cm de comprimento e são conectados à um sistema de aquisição da marca LYNX Tecnologia com caixa de aquisição por tensão. Os dados são coletados a partir do software AqDados 7.02, também da marca LYNX Tecnologia. A Tabela 19 explicita a faixa de pressão dos transdutores utilizados em cada degrau instrumentado do modelo. A instrumentação do modelo LOH II para os ensaios preliminares foi a mesma exibida em 7.1.2. A Tabela 20 apresenta as vazões ensaiadas no modelo LAHE em comparação com as ensaiadas nos modelos LOH I e LOH II. As vazões equivalentes encontram-se na mesma linha.

Tabela 19 – Configuração dos transdutores para os ensaios com aeração induzida no modelo LAHE.

Degrau	Espelho	Patamar
	Faixa (m.c.a.)	Faixa
2	-1 a 2	-1 a 2
3	-1 a 2	-
4	-	-1 a 2
5	-1 a 2	-1 a 2
7	-1 a 2	-
8	-1 a 2	-1 a 3
9	-	-1 a 3
11	-1 a 2	-1 a 3
12	-1 a 2	-1 a 3
14	-1 a 2	-
15	-1 a 2	-1 a 3
16	-1 a 2	-1 a 3

Tabela 20 – Vazões ensaiadas nos três modelos utilizados na presente pesquisa.

LOH - MODELO I – (1:10)			LOH - MODELO II – (1:15)			Q LAHE – (1:10)		
Q modelo (l/s)	q modelo (m ³ /s/m)	q protótipo (m ³ /s/m)	Q modelo (l/s)	q modelo (m ³ /s/m)	q protótipo (m ³ /s/m)	Q modelo (l/s)	q modelo (m ³ /s/m)	q protótipo (m ³ /s/m)
40	0,100	3,2	27	0,054	3,1	115	0,100	3,2
50	0,125	4,0				144	0,125	4,0
60	0,150	4,7	41	0,082	4,8	173	0,150	4,7
80	0,200	6,3	54	0,108	6,3	230	0,200	6,3
100	0,250	7,9						
110	0,275	8,7	75	0,150	8,7	316	0,275	8,7
132	0,330	10,4				380	0,330	10,4
140	0,350	11,1				409	0,355	11,2
			100	0,200	11,6			
			150	0,300	17,4			
			200	0,400	23,2			
			250	0,500	29,0			

Os ensaios foram iniciados nos modelos LOH II e LAHE. Porém, no modelo LOH II, só foi possível conduzir os ensaios até a vazão específica de 0,150 m³/s/m (equivalente a 8,7 m³/s/m em protótipo) devido à ocorrência de entrada de água para o interior da câmara de ar pela abertura no espelho do primeiro degrau, registrada a partir da vazão específica de 0,2 m³/s/m. Verificou-se que o jato formado pela passagem do escoamento pelo defletor não é suficiente para afastar o escoamento do espelho do primeiro degrau, onde está localizada a abertura para entrada de ar. Para o modelo LAHE, o ensaio foi concluído sem problemas devido à maior vazão

escoada no modelo LAHE (em protótipo), ser inferior à vazão de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ no modelo LOH II. Como se deseja ensaiar vazões superiores à definida pela bibliografia para início de danos por cavitação (≈ 15 a $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) concluiu-se que defletores com altura de 6 mm no modelo LOH II (correspondente a 9 mm no modelo LAHE e a 150 mm em protótipo) ou menores, não satisfazem as necessidades da presente pesquisa. A entrada de água pela cavidade da câmara de ar não é permitida por que, além de existir a entrada de água para o interior do corpo da barragem, essa ocorrência influenciaria de forma negativa na inserção de ar para o escoamento. Nesse caso, alterações na geometria da câmara de ar de forma a impedir o retorno da água para o interior da barragem não atenderiam também as demandas da presente pesquisa, pois a entrada de ar seria obstruída pelo acúmulo de água. Considerando-se as informações mencionadas foram sugeridos defletores com alturas maiores para a realização dos ensaios com aeração induzida, de 10, 12, 18 e 24 mm para o modelo LOH II e 15, 18, 27 e 36 mm para o modelo LAHE (Figura 124 e Figura 125).

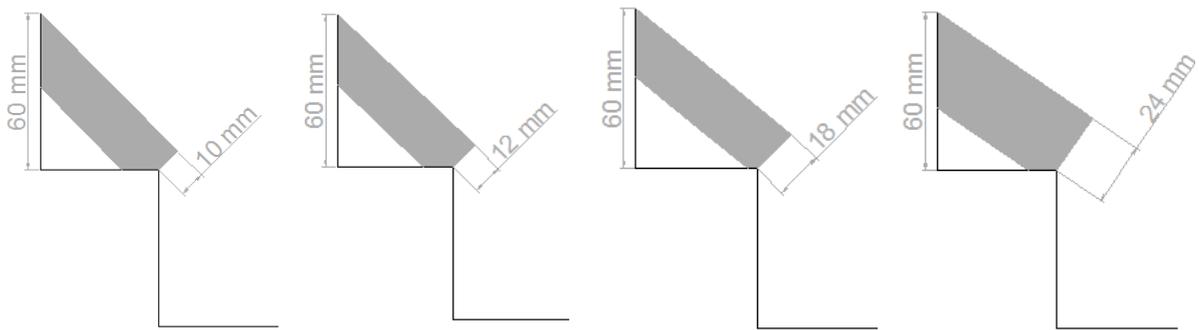


Figura 124 – Segunda opção de defletores sugeridos para ensaios com aeração induzida no modelo LOH II.

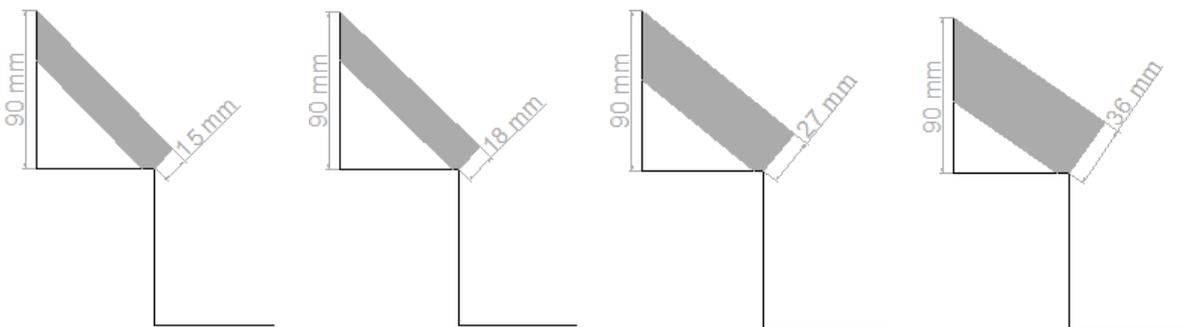


Figura 125 - Segunda opção de defletores sugeridos para ensaios com aeração induzida no modelo LAHE.

Os ensaios foram iniciados no modelo LAHE, com piezômetros e transdutores de pressão. As Figura 126 à Figura 129 apresentam o escoamento com os 4 defletores mencionados, no modelo LAHE, para as menores e maiores vazões ensaiadas ($0,1$ e $0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$). Notou-se que o alcance do jato varia significativamente com a variação

da altura do defletor utilizado (quanto maior a altura do defletor, maior o alcance do jato) e varia com menor amplitude com relação à vazão (quanto maior a vazão, menor o alcance do jato). A Tabela 21 mostra o degrau de alcance do jato para todos os defletores e vazões citados. A definição foi feita a partir da análise visual do escoamento através de fotos e vídeos de todos os ensaios considerando-se o ponto em que a parte inferior do escoamento toca a calha. Dessa forma, é possível que os efeitos do impacto do jato nas pressões médias sejam identificados em degraus situados a jusante desse ponto, no local atingido pela maior parte do escoamento.

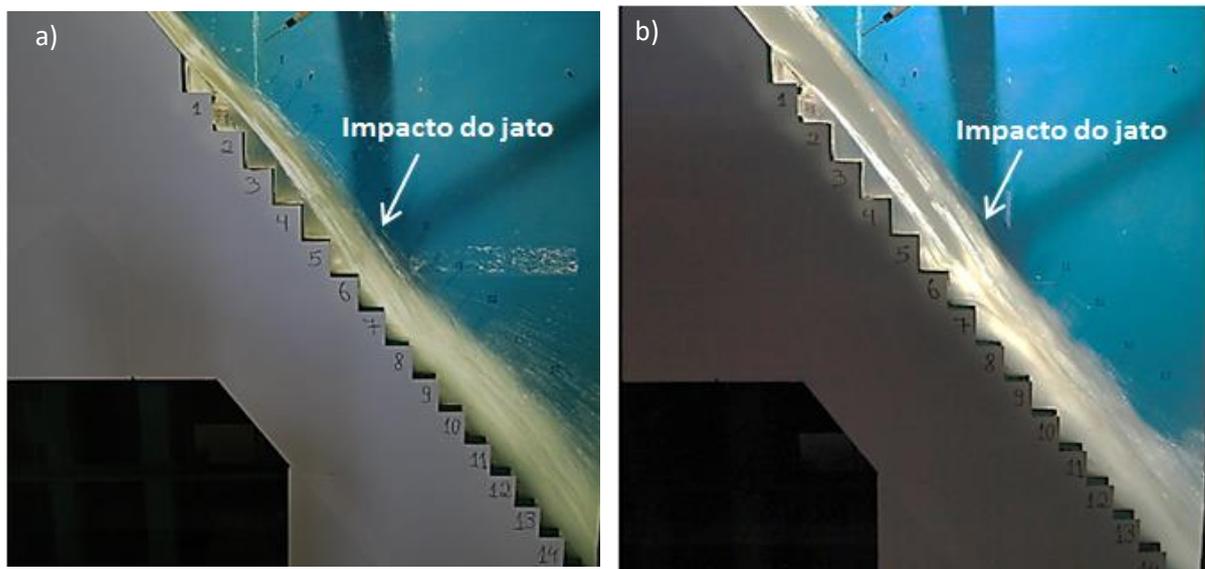


Figura 126 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 15 mm para vazão de (a) $0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) $0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

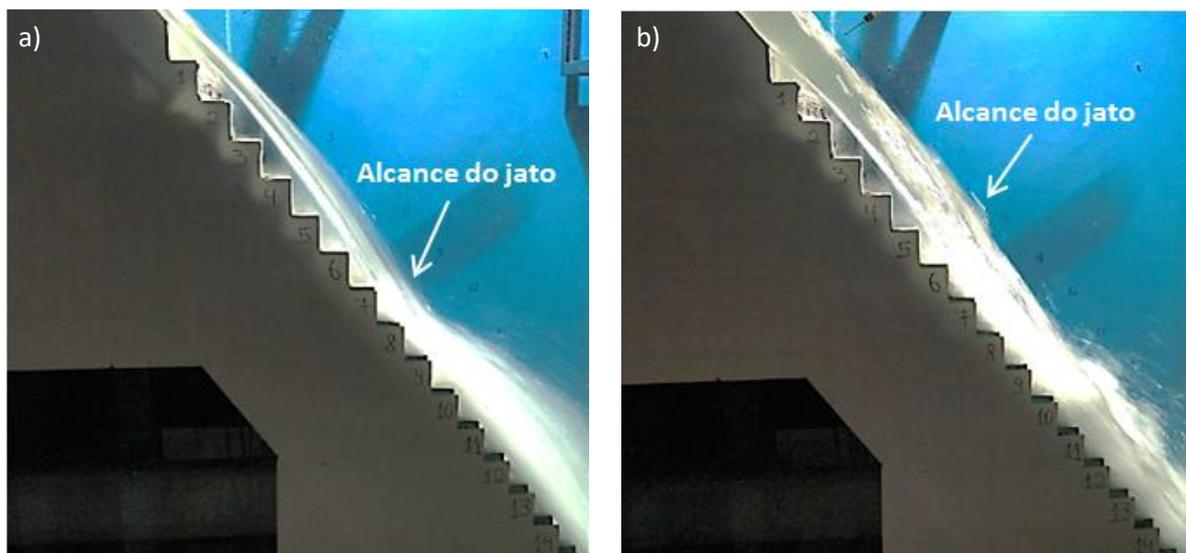


Figura 127 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 18 mm para vazão de (a) $0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) $0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

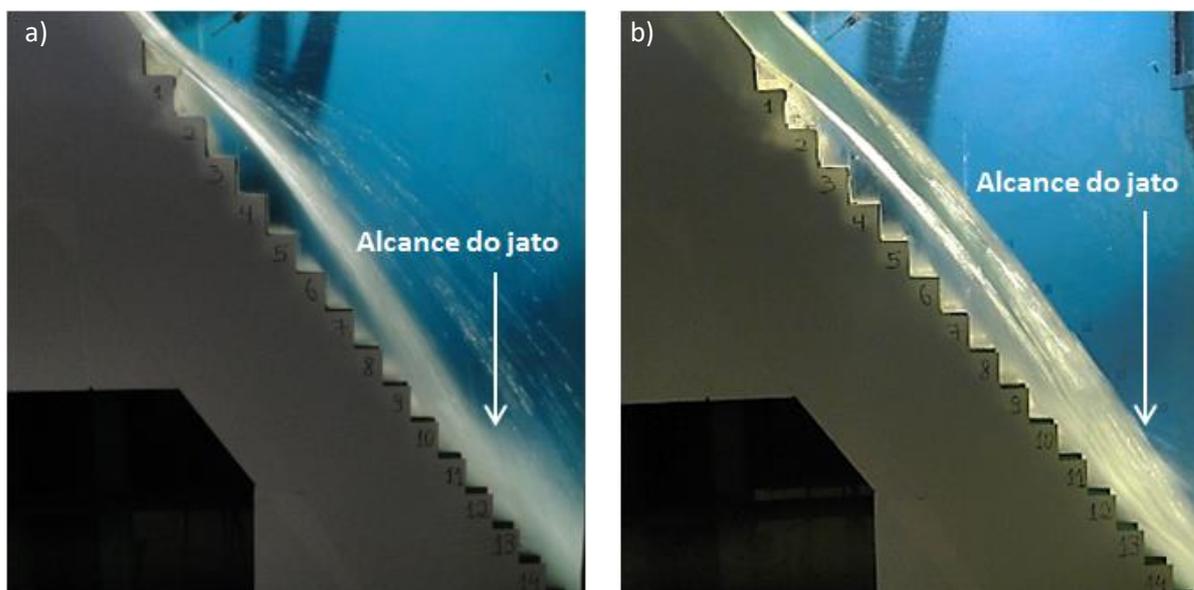


Figura 128 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 27 mm para vazão de (a) $0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) $0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

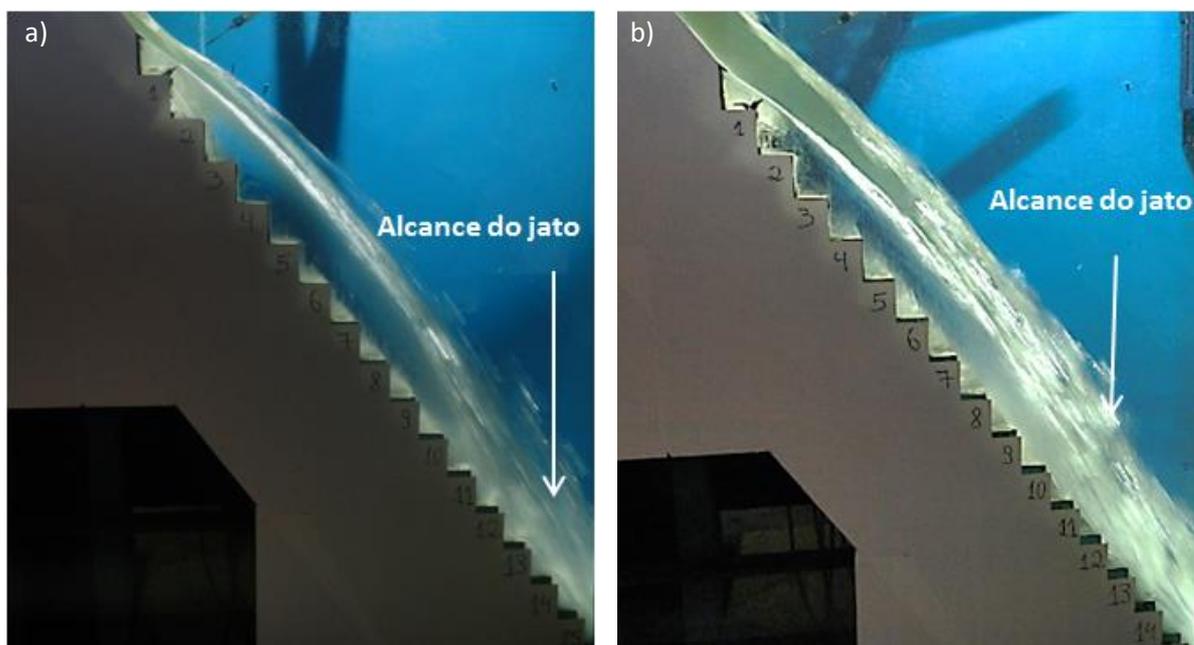


Figura 129 - Escoamento no modelo LAHE com defletor de 27 mm para vazão de (a) $0,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (b) $0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Tabela 21 – Alcance do jato para os defletores testados no modelo LAHE para todas as vazões testadas.

Defletor (mm)	Vazão específica ($\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$)						
	0,100	0,125	0,150	0,200	0,225	0,330	0,355
	Alcance do jato (n° do degrau)						
15	6	6	6	6	6	6	5
18	8	8	8	8	7	7	7
27	12	12	12	12	11	11	11
36	14	14	14	14	13	13	12

Os dados obtidos a partir dos ensaios foram separados em espelhos e patamares dos degraus. Para a análise inicial do funcionamento dos defletores testados, os dados de pressões extremas com 0,1% de probabilidade de não excedência ($P_{0,1\%}$) obtidos para os espelhos dos degraus dos ensaios com os diferentes defletores foram comparados aos dados que foram obtidos no mesmo modelo físico (modelo LAHE), porém para a condição de escoamento de aeração natural, ou seja, sem a presença de elementos aeradores na calha. Essa análise foi escolhida por: a) estarem os baixos valores de pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência ligados à ocorrência de cavitação na estrutura e b) os espelhos dos degraus serem as regiões mais críticas da calha para o desenvolvimento de cavitação. Na Figura 130 estão apresentadas as comparações dos resultados das pressões extremas com 0,1% de probabilidade de não excedência obtidos para os espelhos dos degraus nos ensaios com todos os defletores testados para todas as vazões ensaiadas. Percebeu-se uma inconsistência nos valores obtidos para o patamar 2 no ensaio com defletor de 36 mm, então esses dados foram retirados dos gráficos.

Percebe-se, analisando a figura, que as pressões são próximas à zero nas tomadas de pressão a montante do impacto do jato, como já era esperado, devido à entrada de ar pela câmara de ar. Salienta-se que as pressões medidas são relativas e, nesse caso, pressões nulas correspondem à pressão atmosférica. Nessa região, as pressões são significativamente superiores às pressões desenvolvidas no escoamento com aeração natural. A partir do encontro do escoamento com os degraus o comportamento das pressões com velocidades baixas e com velocidades altas é bastante diferenciado.

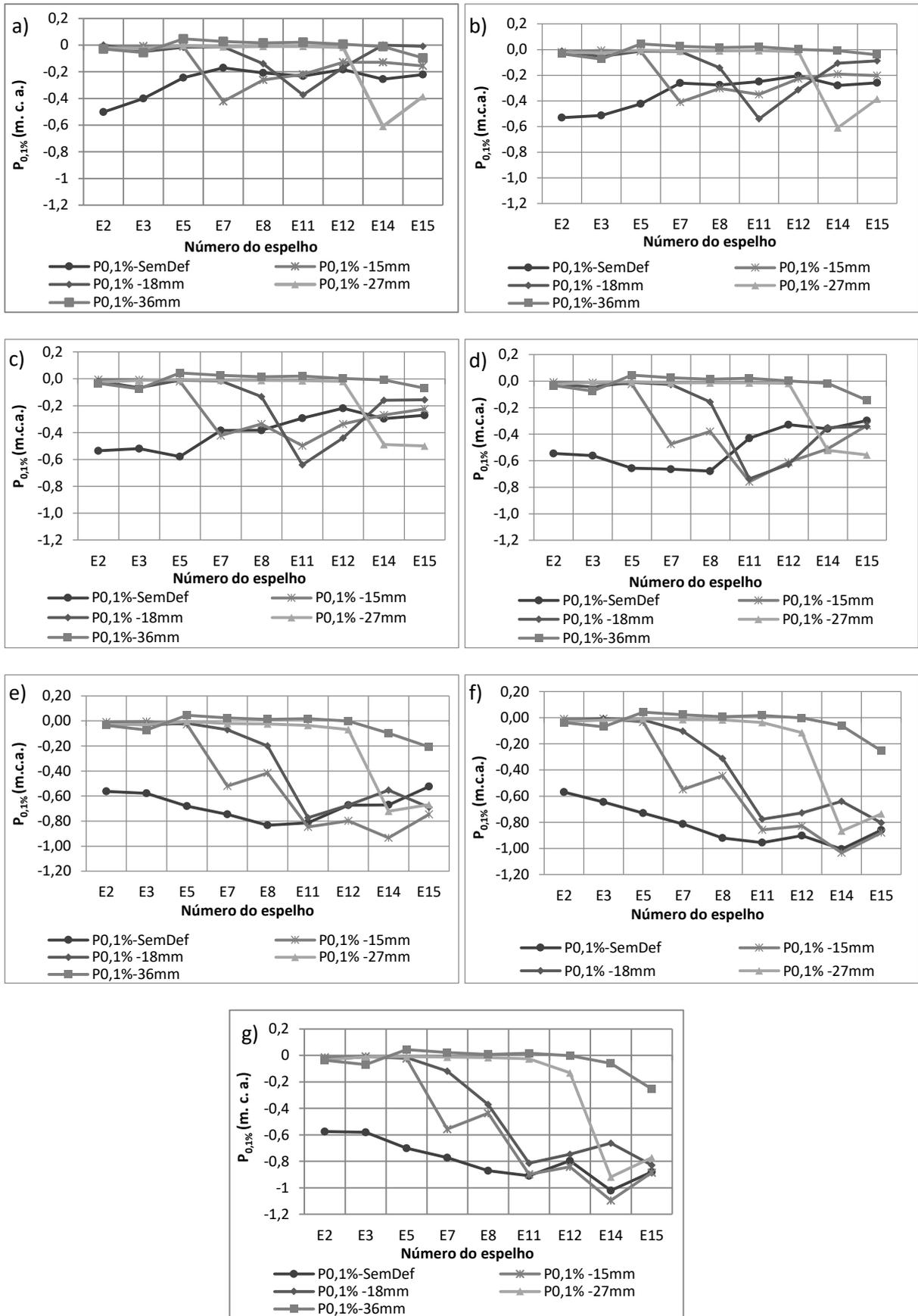


Figura 130 - Comparação entre os resultados de pressões extremas com 0,1% de probabilidade de não excedências nos espelhos para os ensaios com aerção natural e com defletores de 15, 18, 27 e 36 mm para vazão de (a) 0,100 m³/s/m, (b) 0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m e (g) 0,355 m³/s/m no modelo LAHE.

Na Figura 130 (a e b) observa-se que, na situação de escoamento com aeração natural, há um pico negativo na parte inicial da calha, provavelmente onde o escoamento ainda não está aerado. Como, para baixas vazões, a aeração tem seu início ainda nos primeiros degraus da calha, observa-se uma elevação nas pressões até aproximadamente o degrau 7. A partir desse degrau os dados oscilam tendendo a um determinado valor. Percebe-se, também, um pico negativo de pressões para o escoamento com aeração induzida na região próxima ao impacto do jato. Esse pico de pressões é inferior às pressões do escoamento com aeração natural. O pico de maior magnitude foi detectado para o escoamento com defletor de 27 mm, provavelmente em razão de que o defletor de 36 mm lança o escoamento até os degraus finais da calha, estando estes fora das medições realizadas. Para os defletores de 15 e 18 mm, as pressões tendem a sofrer uma elevação no sentido do comprimento da calha, porém atingem valores inferiores aos do escoamento com aeração natural a partir de aproximadamente os degraus 10 e 12, respectivamente. Para os defletores de 27 e 36 mm, é impossível verificar o comportamento das pressões a jusante do encontro do escoamento com a calha devido ao comprimento do jato formado.

Na Figura 130 (c a g) percebe-se que as pressões referentes ao escoamento com aeração natural decaem ao longo da calha até um pico de valor negativo e voltam a subir, com exceção da maior vazão ($0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$) onde verifica-se apenas decréscimo nos valores das pressões ao longo de toda a calha. Como entende-se que o acréscimo das pressões ocorre após o ponto de início de aeração, isso provavelmente ocorre devido à não ocorrência da aeração total do escoamento com vazões superiores a $0,355 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Para o escoamento com defletor de 36 mm, nota-se, apenas, uma redução nas pressões na parte final da calha, devido ao comprimento do jato ser maior do que a abrangência das medições. Para os defletores de 27, 18 e 15 mm, percebe-se a ocorrência de pressões negativas com valores próximos às pressões do escoamento com aeração natural.

A partir das observações citadas acima, concluiu-se que os defletores com 27 e 36 mm não satisfazem as necessidades da presente pesquisa por lançarem o escoamento para os degraus finais da calha e, dessa forma, uma grande quantidade de degraus deixa de desempenhar sua função. Além disso, considerando-se que a calha possui 20 degraus, o lançamento do jato até sua parte final proporcionará instabilidades no escoamento que atinge a bacia de dissipação a jusante. Embora o

modelo LOH II possua, consideravelmente, quantidade maior de degraus, entende-se que o defletor deve atender tanto a barragens mais altas, quanto as de menor altura. Os defletores de 15 e 18 mm apresentaram um comprimento de jato aparentemente adequado, porém os resultados das análises das pressões extremas com 0,1% de probabilidade de não excedência não foram suficientes para indicar uma influência significativa nas pressões ao longo da calha em relação aos valores do escoamento com aeração natural. Sendo assim optou-se por estudar outras geometrias de defletor. As novas geometrias foram baseadas no adequado comprimento de jato criado pelos defletores de 15 e 18 mm. Mantendo-se o pensamento de que menores alturas de defletor são responsáveis pelo melhor aproveitamento dos degraus, optou-se por manter a altura do defletor (t) correspondente a 15 mm no modelo LAHE (10 mm no modelo LOH II) e variar seu comprimento prolongando sua parte final no sentido do fluxo de água (b) (Figura 131). Nesse caso, espera-se que tais prolongamentos sejam suficientes para alterar o percurso do jato de forma a favorecer a entrada de ar, porém insuficientes para lançar o jato para a parte final da calha. Os prolongamentos foram definidos em 32,25 mm, 18,75 mm e 0 mm, esse último correspondendo ao defletor já testado. Os valores equivalentes para o modelo LOH II são: 21,5 mm, 12,75 mm e 0 mm (Figura 131). Primeiramente foi definido o prolongamento de 21,5 mm por ser o valor máximo que não obstrui a entrada de ar pelo espelho do degrau. O valor de 12,5 foi determinado por ser um valor intermediário entre 0 e 21,5 mm.

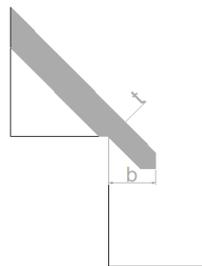


Figura 131 – esquema da nova geometria dos defletores.

APENDICE C – DETALHES SOBRE A INSTALAÇÃO DOS TRANSDUTORES NO MODELO LOH II

Os transdutores são conectados nas tomadas d'água, instaladas próximo às arestas externas dos patamares e espelhos dos degraus, através de mangueiras com comprimento em torno de 20 cm e a uma caixa de aquisição construída no LOH que é conectada a um sistema de aquisição da marca National Instruments (Figura 132). Os dados de pressão foram adquiridos simultaneamente para todos os transdutores por 10 minutos com frequência de 100 Hz. O tempo de ensaio foi determinado de acordo com ensaios preliminares descritos no Apêndice D, de acordo com a capacidade de frequência dos transdutores (100 Hz). A eficiência dos transdutores de pressão também foi testada a partir de resultados de ensaios com piezômetros. Esses ensaios estão apresentados no Apêndice E. A Tabela 22 apresenta o transdutor utilizado na tomada de pressão de cada degrau e a sua faixa de operação.



Figura 132 - Conexão dos transdutores na calha em degraus e caixa e sistema de aquisição utilizados

Tabela 22 – Configuração dos transdutores para os ensaios com aeração induzida no modelo LOH II.

Degrau	Espelho		Patamar	
	Transdutor	Faixa (m.c.a.)	Transdutor	Faixa
2	OM01	-0,7 a 0,7	OM02	-0,7 a 0,7
3	OM03	-0,7 a 0,7	OM04	-0,7 a 0,7
4	OM05	-0,7 a 0,7	OM06	-0,7 a 0,7
5	SN26	-1,5 a 1,5	H1	-0,5 a 1,5
6	OM07	-1,75 a 1,75	OM19	-3,5 a 3,5
7	OM08	-1,75 a 1,75	OM20	-3,5 a 3,5
8	OM09	-1,75 a 1,75	OM21	-3,5 a 3,5
9	OM10	-1,75 a 1,75	OM22	-3,5 a 3,5
10	OM11	-1,75 a 1,75	S101	-0,7 a 2,75
11	OM12	-1,75 a 1,75	S102	-0,7 a 2,75
12	OM13	-1,75 a 1,75	S103	-0,7 a 2,75
13	OM14	-1,75 a 1,75	S104	-0,7 a 2,75
14	OM15	-1,75 a 1,75	S105	-0,7 a 2,75
15	OM16	-1,75 a 1,75	S106	-0,7 a 2,75
16	OM17	-1,75 a 1,75	S107	-0,7 a 2,75
17	OM18	-1,75 a 1,75	S108	-0,7 a 2,75
20	SN3	-1,5 a 3	S109	-0,7 a 2,75
21	SN11	-1,5 a 1,5	SN4	-1,5 a 3
25	SN12	-1,5 a 1,5	SN5	-1,5 a 3
26	SN13	-1,5 a 1,5	SN6	-1,5 a 3
29	SN14	-1,5 a 1,5	SN7	-1,5 a 3
32	SN15	-1,5 a 1,5	SN8	-1,5 a 3
35	SN16	-1,5 a 1,5	SN9	-1,5 a 3
36	SN17	-1,5 a 1,5	SN10	-1,5 a 3
40	SN19	-1,5 a 1,5	SN18	-1,5 a 3
42	SN20	-1,5 a 1,5	SN22	-1,5 a 3
46	SN24	-1,5 a 1,5	SN23	-1,5 a 3
51	SN25	-1,5 a 1,5	SN28	-1,5 a 3

APENDICE D – ENSAIOS PRELIMINARES PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE ENSAIO

Como o tempo de ensaios de 10 minutos, utilizados para os ensaios preliminares, mostrou-se adequado para a dinâmica dos ensaios, foram realizados alguns testes para verificação se esse tempo é adequado para a aquisição dos dados a serem analisados ao longo da pesquisa. Foi realizado um ensaio com o defletor de t10 b 12,25 instalado na calha em degraus no modelo LOH II. O ensaio foi realizado com vazão de 0,5 m³/s/m (por ter-se verificado ser a mais crítica) por um tempo de 90 minutos e frequência de 100 Hz. Os dados foram adquiridos em três diferentes posições da calha conforme Tabela 23. Foram selecionados apenas espelhos dos degraus por representarem uma condição mais crítica em comparação com os patamares dos degraus. Para a análise dos dados, adotou-se como base a metodologia utilizada por Teixeira (2003). A amostra de 90 minutos foi considerada como ponto de referência e foi dividida em sub-amostras menores de diferentes durações (1 amostra de 90 min, 3 amostras de 30 min, 9 amostras de 10 minutos, 18 amostras de 5 minutos e 90 amostras de 1 minuto). Na sequência foram calculadas as médias e desvios padrão de cada uma das sub-amostras. As Figura 133 à Figura 140 apresentam os resultados obtidos. Nos gráficos, as linhas vermelhas limitam a dispersão dos dados relativa ao erro do equipamento de medição e foram calculadas somando e subtraindo o erro do transdutor do valor obtido para a amostra de referência (90 min).

Tabela 23 – Degraus e transdutores utilizados para o ensaio para verificação do tempo de aquisição de dados de pressão.

Degrau	Transdutor
7	OM 8
15	OM 16
29	SN 14
40	SN 19

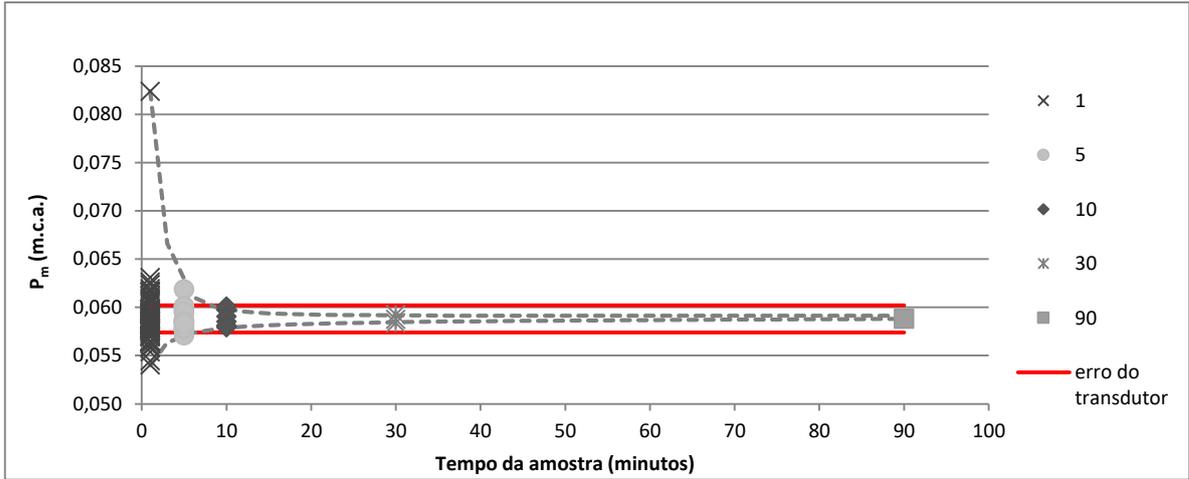


Figura 133 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – pressões médias - transdutor OM 8 – degrau 7.

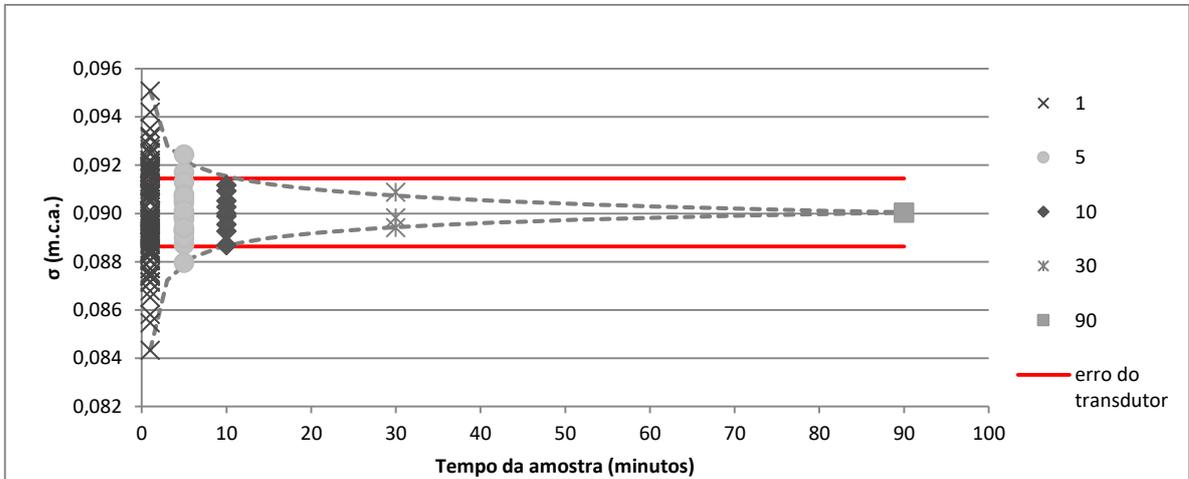


Figura 134 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão - desvios padrão - transdutor OM 8 – degrau 7.

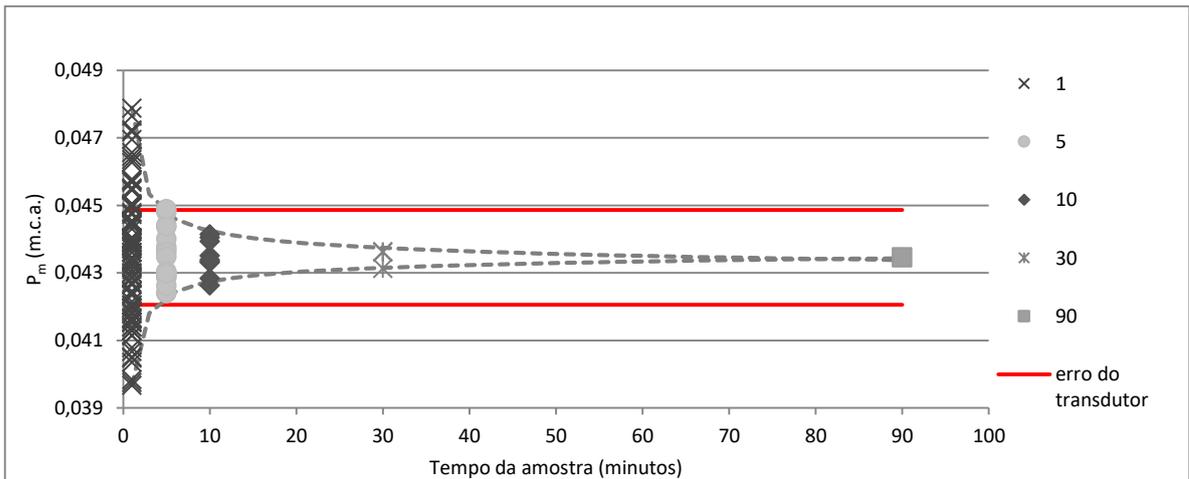


Figura 135 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – pressões médias - transdutor OM16 – degrau 15.

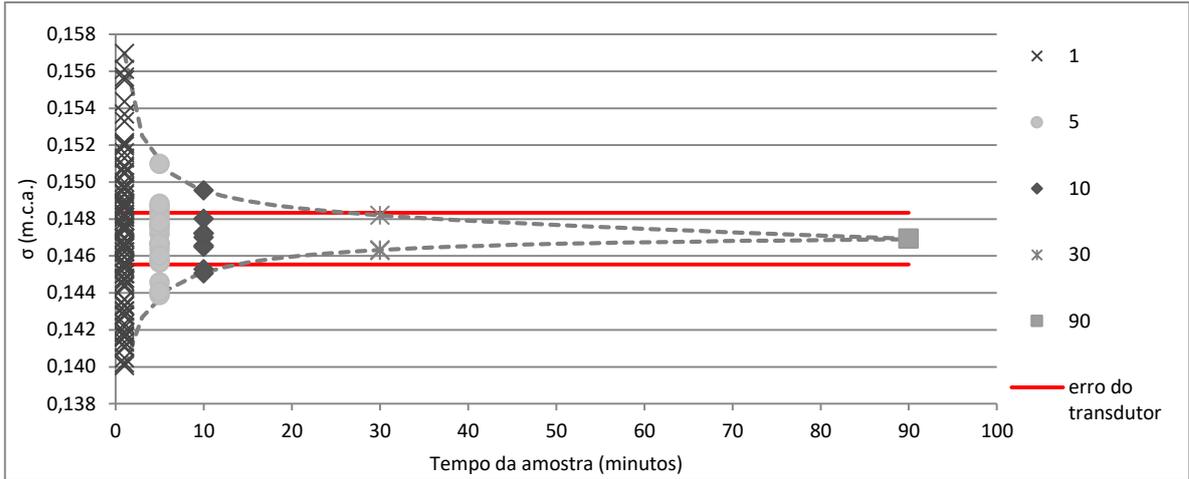


Figura 136 – Determinação de tempo de aquisição de pressão – desvios padrão – transdutor OM16 – degrau 15.

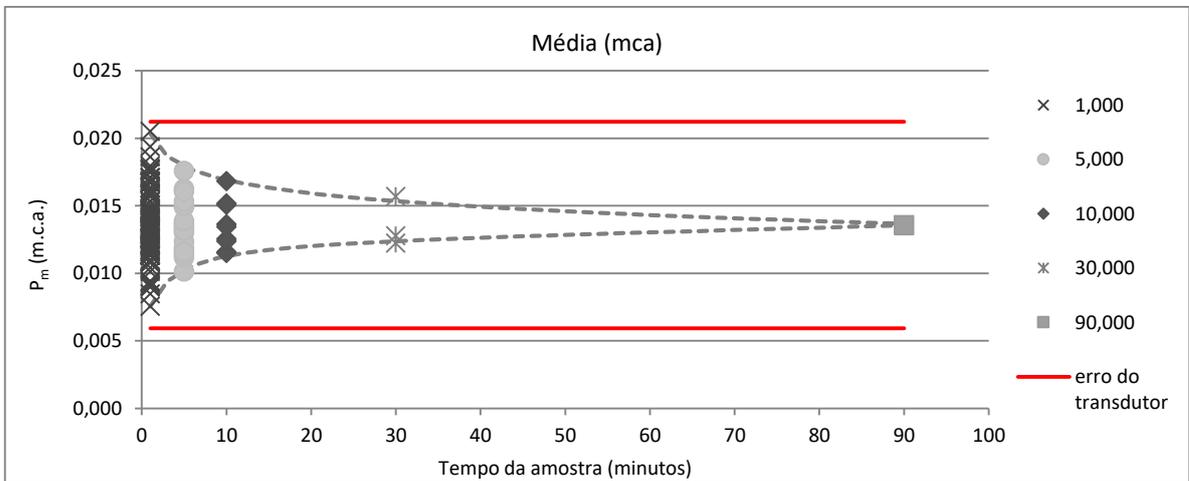


Figura 137 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão - pressões médias - transdutor SN14 – degrau 29.

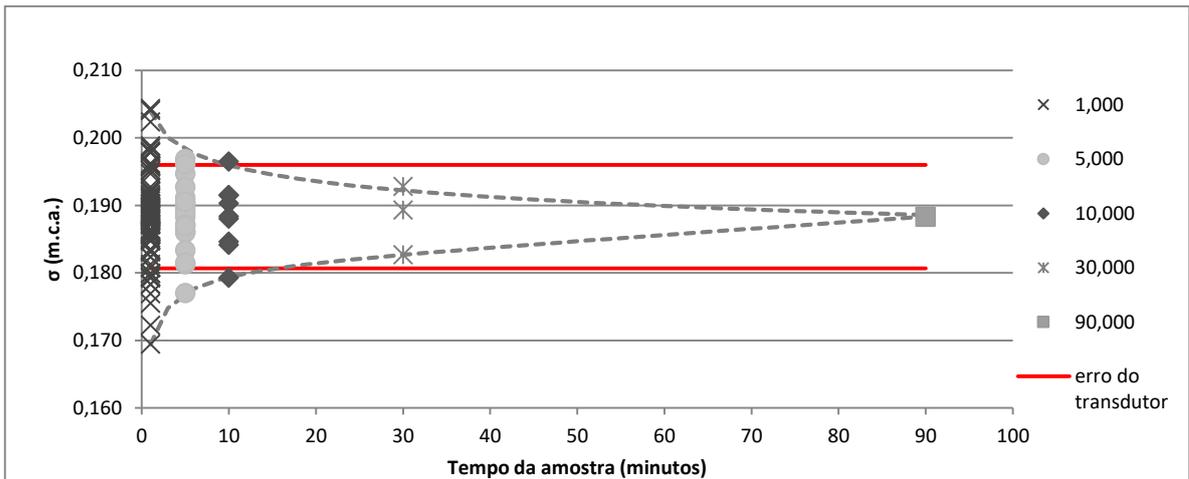


Figura 138 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – desvios - transdutor SN14 – degrau 29.

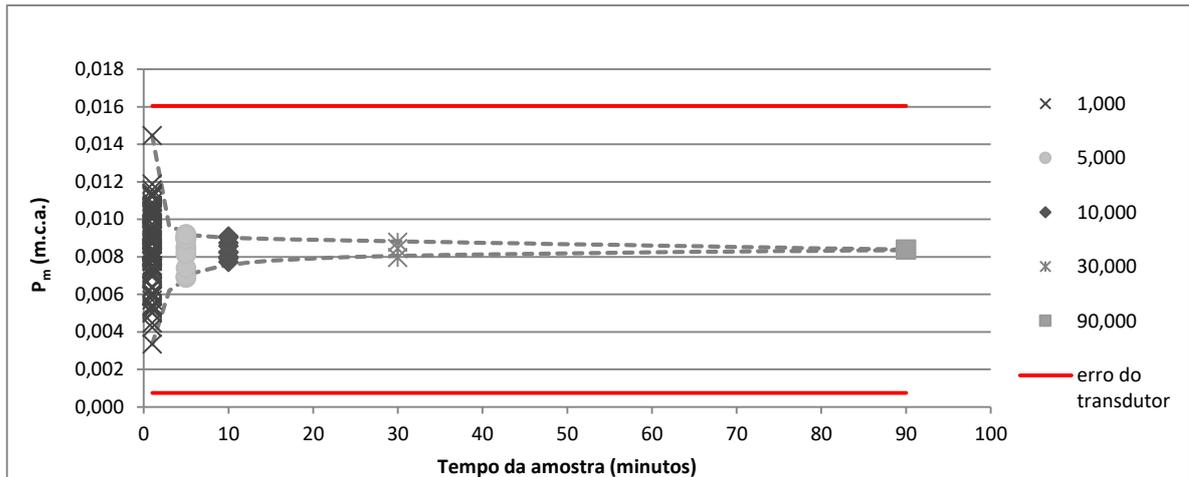


Figura 139 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – pressões médias - transdutor SN19 – degrau 40.

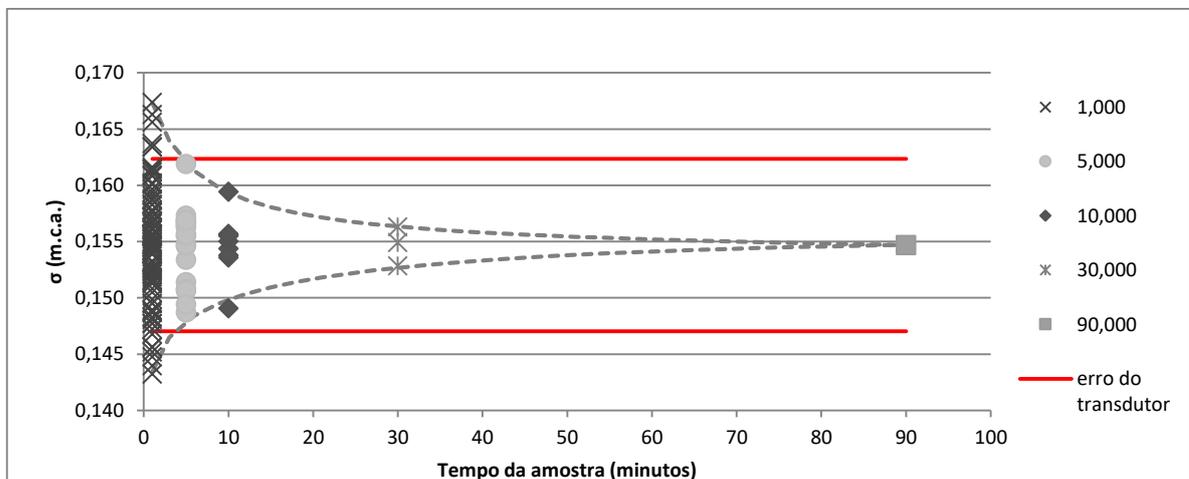


Figura 140 – Determinação de tempo de aquisição de dados de pressão – desvios - transdutor SN19 – degrau 40.

Para todos os transdutores analisados, os resultados das médias das amostras de 10 minutos de duração ficaram no interior da zona delimita pelo erro do transdutor o que significa que, para esse parâmetro, o tempo de 10 minutos de ensaio é eficiente. Apesar de que, os desvios para algumas amostras de 10 minutos de duração ficaram externos à zona delimitada pelo erro do equipamento, verificou-se que a maior dispersão encontrada em relação ao erro foi de 1,4 mm para o transdutor SN14, o que foi considerado aceitável para a pesquisa.

Além disso, foram analisadas as distribuições de probabilidade das amostras através do diagrama de Pearson (conforme Lhamas (1987)). Os coeficientes β_1 e β_2 foram calculados conforme a Equação 73 e a Equação 74 e plotados no diagrama de Pearson (Figura 141). As Figura 142 à Figura 145 apresentam os resultados obtidos.

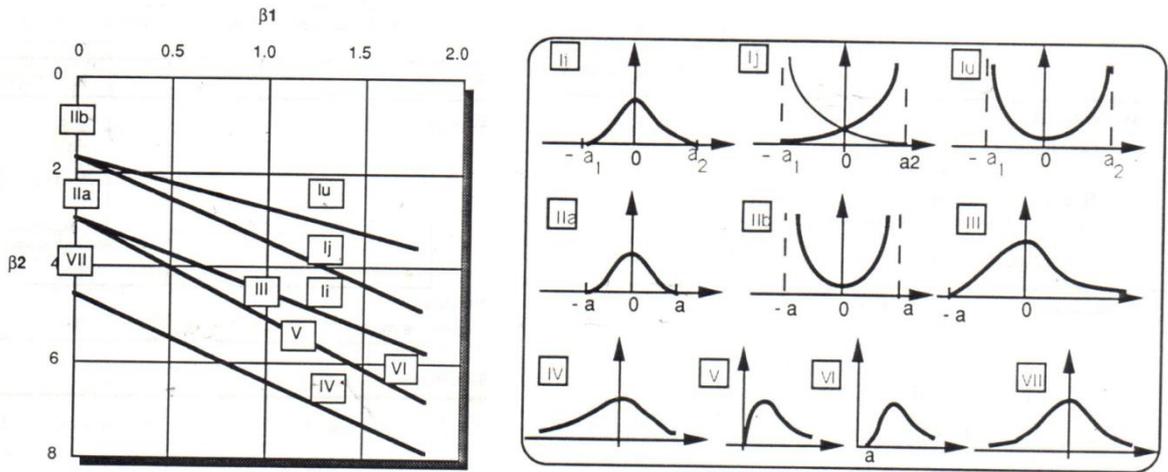


Figura 141 – Diagrama de Pearson (fonte: Lhamas, 1987)

$$\beta_1 = \frac{[N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^3]^2}{[N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2]^3}$$

Equação 73

$$\beta_2 = \frac{[N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^4]}{[N^{-1} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^2]^2}$$

Equação 74

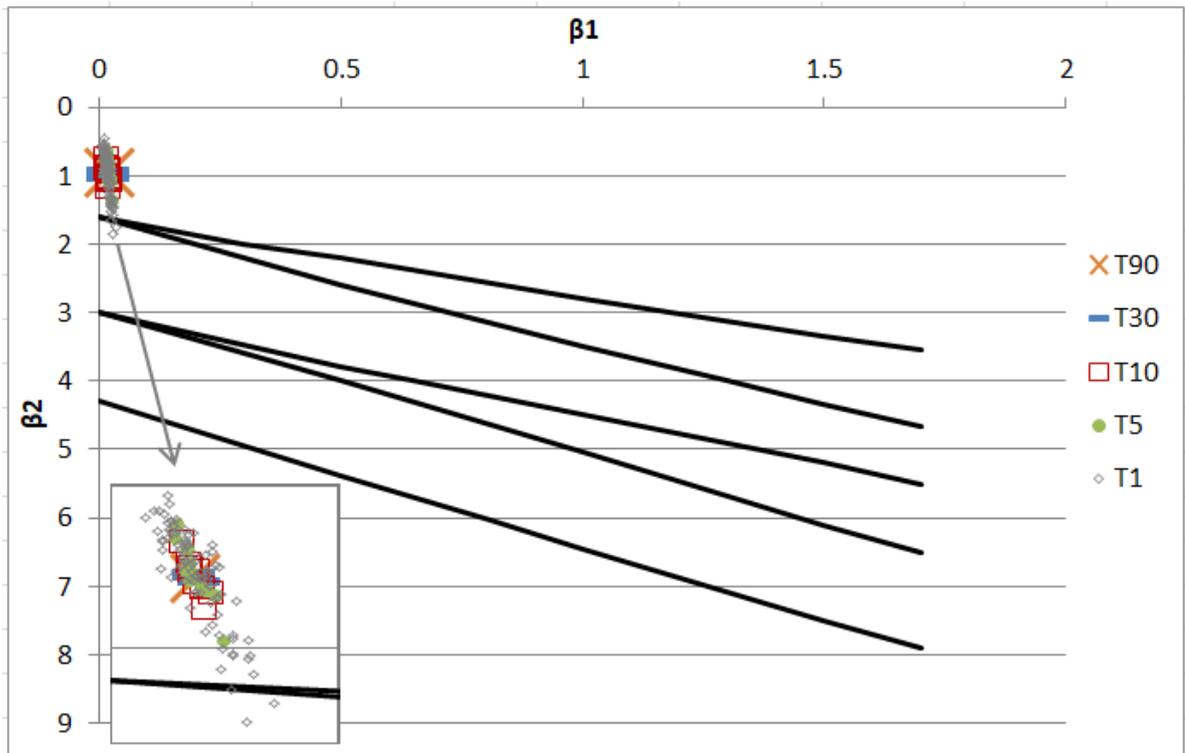


Figura 142 – Dados obtidos para o transdutor OM8 – degrau 7, plotados no diagrama de Pearson.

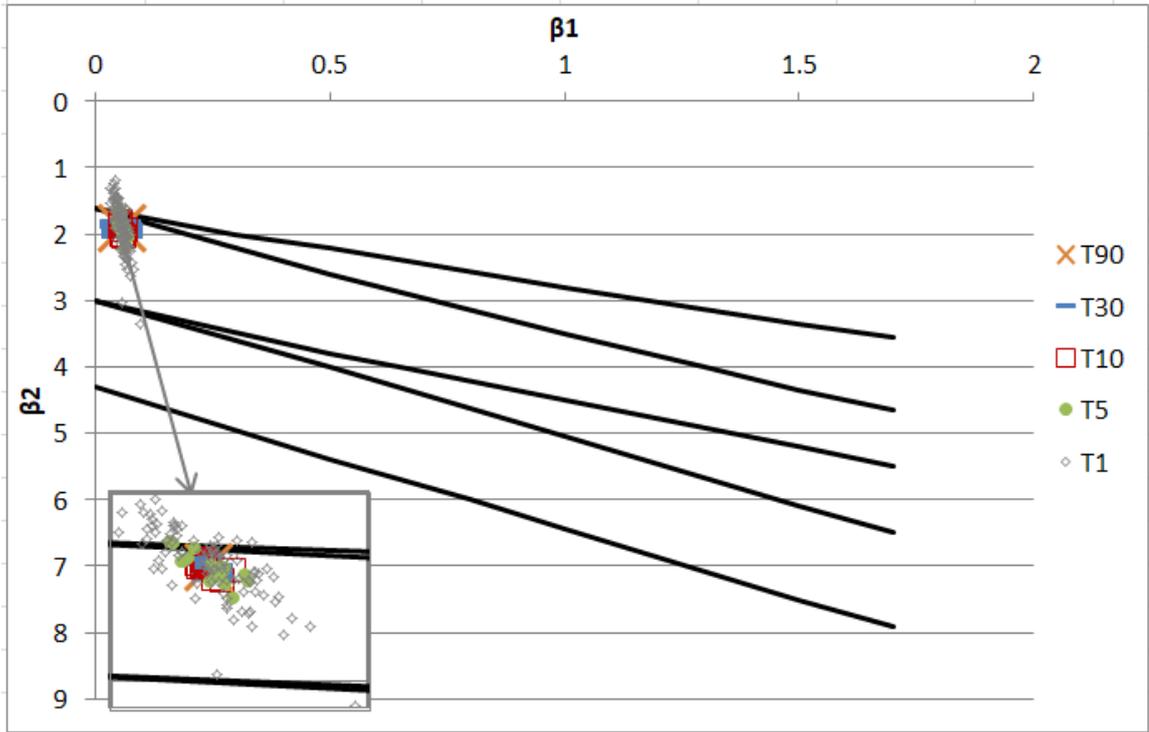


Figura 143 – Dados obtidos para o transdutor OM16 – degrau 15, plotados no diagrama de Pearson.

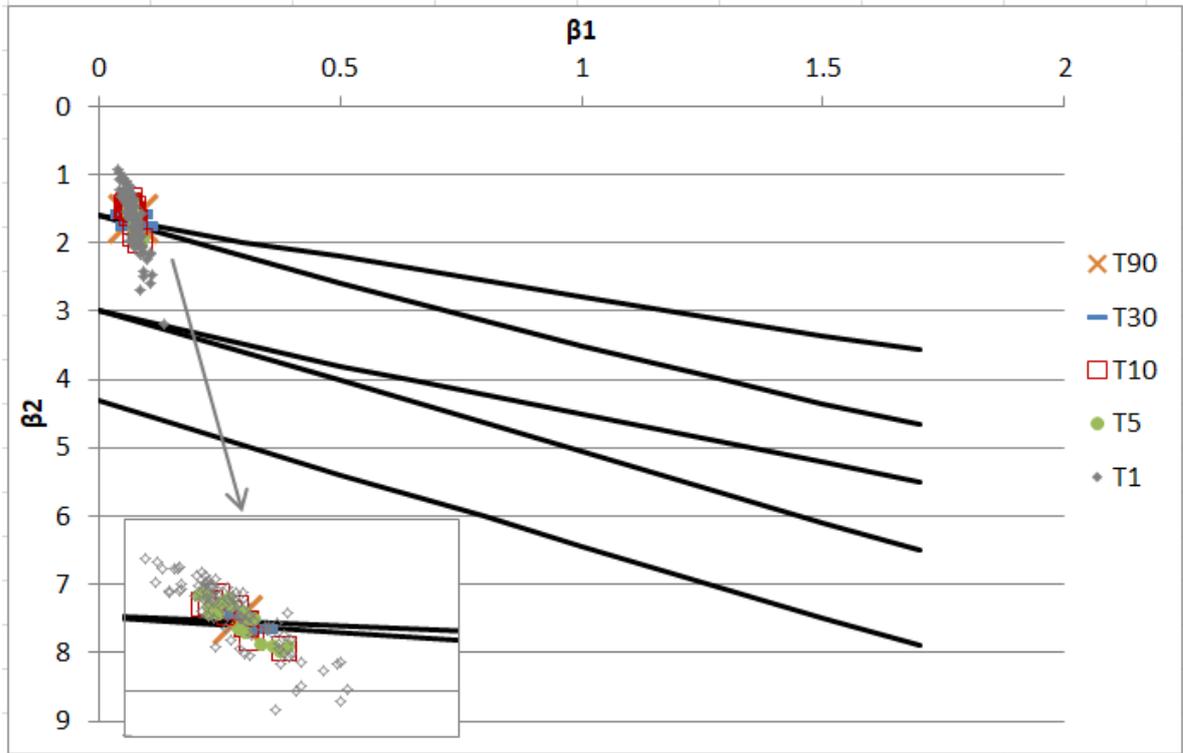


Figura 144 – Dados obtidos para o transdutor SN14 – degrau 15, plotados no diagrama de Pearson.

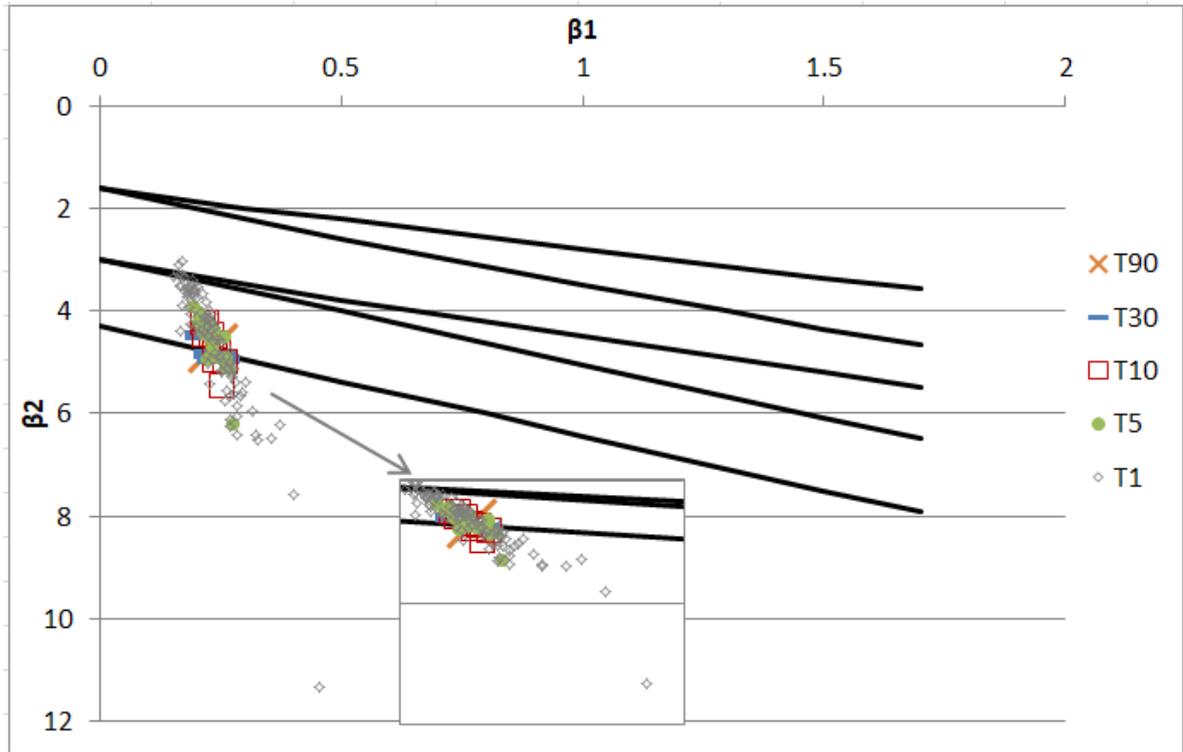


Figura 145 – Dados obtidos para o transdutor SN19 – degrau 40, plotados no diagrama de Pearson.

Percebeu-se que os dados das sub-amostras com tempo de aquisição a partir de 5 minutos tenderam a se concentrar próximo aos resultados da amostra referência (90 minutos), apenas as amostras de 1 minuto apresentaram dispersão significativa em relação à amostra de referência. Para os transdutores SN14 e SN19, se identificou que os dados atravessam as linhas limites de distribuição de probabilidade mesmo para as amostras de maior tempo de duração. Porém se identificou que isso se justifica devido ao resultado da amostra de referência estar localizado na zona de transição entre diferentes distribuições de probabilidade. Sendo assim, concluiu-se que o tempo de aquisição de 10 minutos é suficiente para garantir a qualidade desejada dos dados.

APENDICE E – ENSAIOS PRELIMINARES PARA DETERMINAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

Os transdutores de pressão foram utilizados para as medições das pressões desenvolvidas na calha devido a serem capazes de medir dados instantâneos que podem ser tratados para a obtenção de pressões com determinadas probabilidades de não excedência. Para verificar o seu correto funcionamento, é indicado que os seus resultados de pressões médias sejam comparados com os mesmos resultados obtidos por piezômetros, já que esses tem sua eficiência comprovada para obtenção dessa grandeza.

A verificação do funcionamento dos transdutores de pressão foi realizada através de ensaios conduzidos no modelo LAHE com os defletores de 15, 18, 27 e 36 mm. Inicialmente a calha do modelo foi instrumentada com piezômetros e, na sequência, com transdutores de pressão (depois de devidamente aferidos), de modo que, para cada geometria de defletor testada e para cada vazão ensaiada, houvesse resultados de pressões medidas com ambos os equipamentos. Os ensaios com piezômetros foram realizados com o auxílio de um quadro piezométrico como mostra a Figura 146. Os transdutores de pressão utilizados foram da marca Zurich com faixas de pressão indicadas na Tabela 19.

O mesmo procedimento de comparação de resultados de transdutores de pressão e piezômetros foi realizado com os equipamentos disponíveis para utilização no modelo LOH II para a situação de aeração natural do escoamento que foi utilizada em trabalhos paralelos, resultando em valores adequados de medida de transdutores e dispensando, assim, a necessidade de repetição do procedimento para a presente pesquisa.

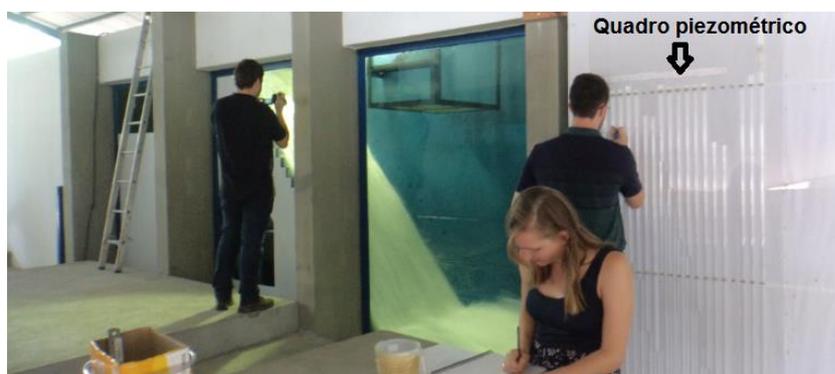


Figura 146 – Ensaio sendo realizado com piezômetros no modelo LAHE.

Durante a realização dos ensaios com transdutores, definiu-se a realização de uma medição com o modelo seco antes de iniciar a passagem do escoamento (denominado zero inicial) com aquisição de dados com frequência de 100 Hz e tempo de aquisição de 1 minuto. Na sequência são realizados os ensaios com as vazões determinadas com aquisição dos dados por 10 min a uma frequência também de 100 Hz. Após o desligamento das bombas, ao cessar a passagem de água pela calha em degraus, foram adquiridos dados mais uma vez por 1 minuto com frequência de 100 Hz (zero final). A medição dos zeros é importante devido aos transdutores medirem pressões relativas. Sendo assim, para cada ensaio, o valor do zero medido deve ser subtraído dos valores medidos pelos transdutores durante o escoamento. A definição da frequência dos ensaios foi definida de acordo com a capacidade dos transdutores de pressão disponíveis. A definição de tempo de aquisição de dados para os ensaios preliminares foi baseada em especificações da bibliografia e de pesquisas anteriormente realizadas no laboratório (por exemplo Conterato, 2011).

As pressões médias obtidas por ambos os equipamentos foram comparadas para cada vazão e para cada defletor. A Figura 147 à Figura 152 apresentam essa comparação para patamares e espelhos dos degraus. Na legenda das figuras, P – valor médios se refere à média das pressões medidas pelos piezômetros, T - Zero inicial e T - Zero final se referem às pressões médias medidas pelos transdutores durante o escoamento, subtraindo-se o zero inicial e zero final respectivamente. Nota-se que a medição com transdutores com zero final foi mais próxima dos dados de piezômetro do que a que utilizou o zero inicial. Comparando-se as séries P-valor médio e T-zero final, a maior diferença observada ocorreu no espelho 8 e foi da ordem de 0,03 m.c.a., a proximidade entre os resultados valida os valores médios medidos pelos transdutores de pressão. Destaca-se que dados obtidos para o defletor de 36 mm não estão apresentados, pois ocorreu um problema nos valores das séries “zero final” e “zero inicial”. Para o restante das análises, foi utilizado o zero final obtido no ensaio com o defletor de 27 mm por ser o ensaiado anteriormente ao defletor de 36 mm.

No LOH, uma metodologia semelhante foi realizada para verificação do desempenho dos transdutores de pressão durante ensaios semelhantes realizados com aeração natural que foram utilizados em pesquisas paralelas.

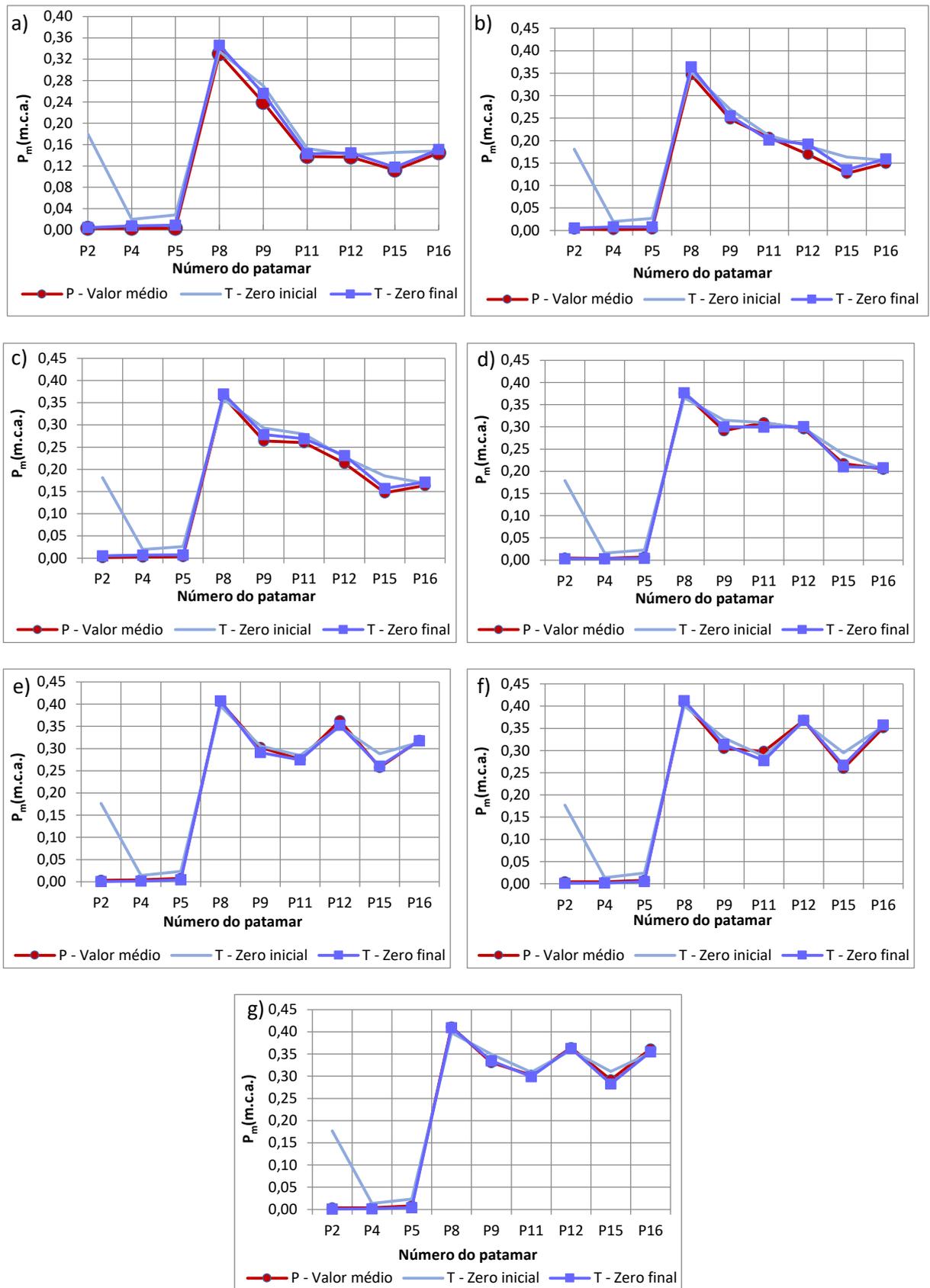


Figura 147 – Comparação valores de pressões médias obtidos por pizômetros e transdutores de pressão para os patamares dos degraus no modelo LAHE com defletor de 15 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b) 0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.

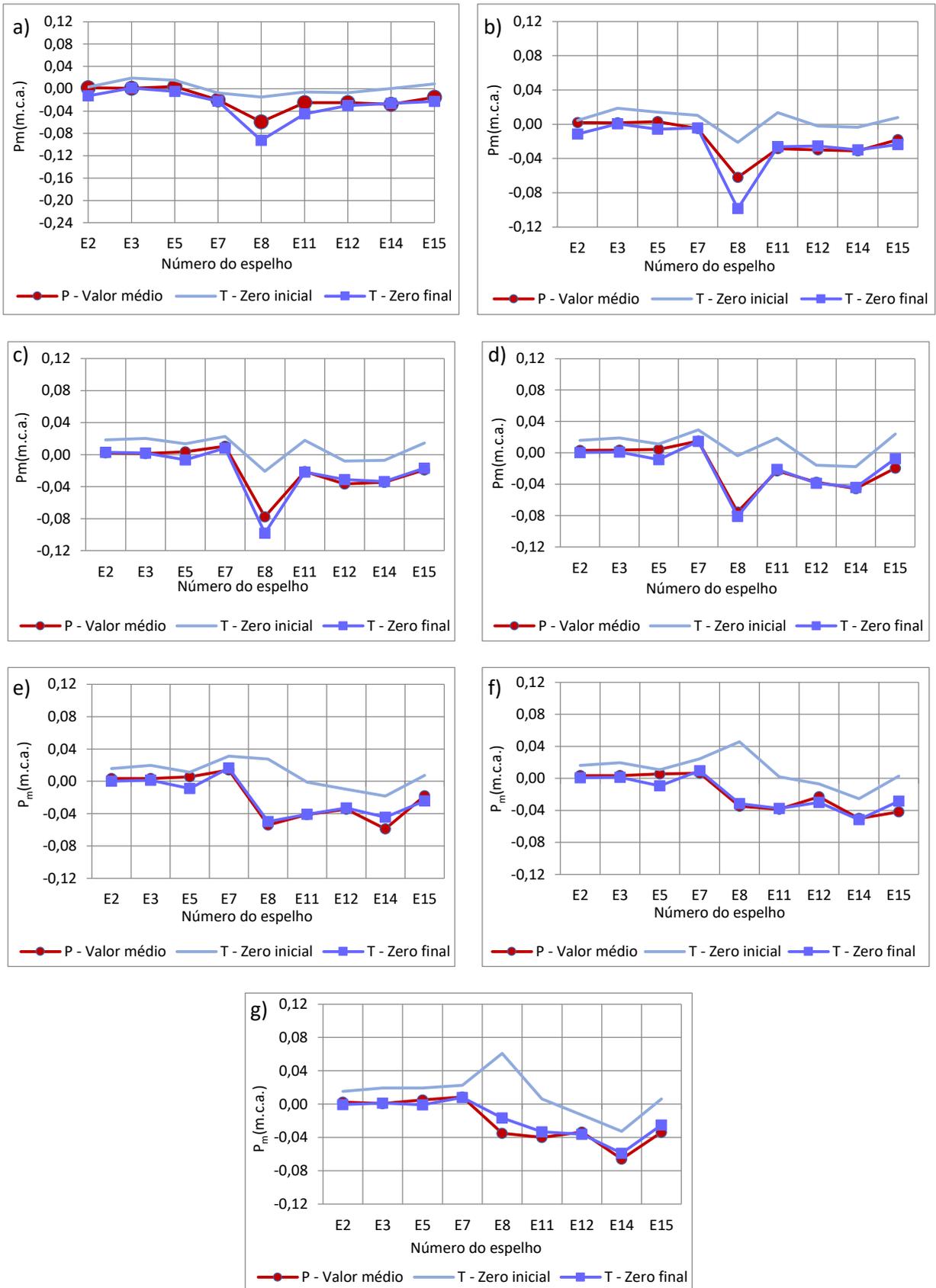


Figura 148 - Comparação valores de pressões médias obtidos por pizômetros e transdutores de pressão para os espelhos dos degrausdo modelo LAHE com defletor de 15 mm para as vazões (a) 0,100 $m^3/s/m$, (b) 0,125 $m^3/s/m$, (c) 0,150 $m^3/s/m$, (d) 0,200 $m^3/s/m$, (e) 0,225 $m^3/s/m$, (f) 0,330 $m^3/s/m$, (g) 0,355 $m^3/s/m$.

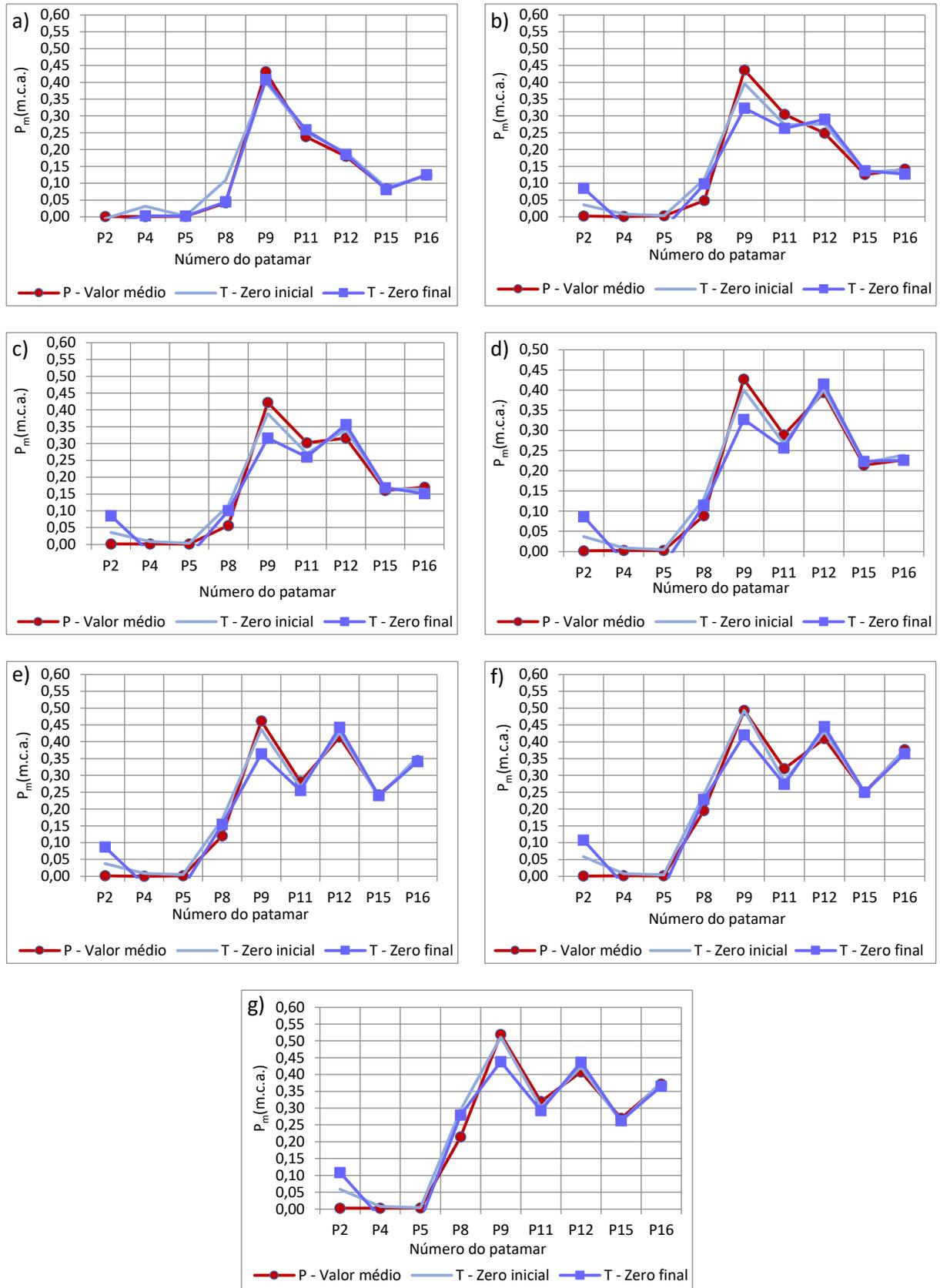


Figura 149 - Comparação valores de pressões médias obtidos por pizômetros e transdutores de pressão para os patamares dos degraus do modelo LAHE com defletor de 18 mm para as vazões (a) 0,100 $m^3/s/m$, (b) 0,125 $m^3/s/m$, (c) 0,150 $m^3/s/m$, (d) 0,200 $m^3/s/m$, (e) 0,225 $m^3/s/m$, (f) 0,330 $m^3/s/m$, (g) 0,355 $m^3/s/m$.

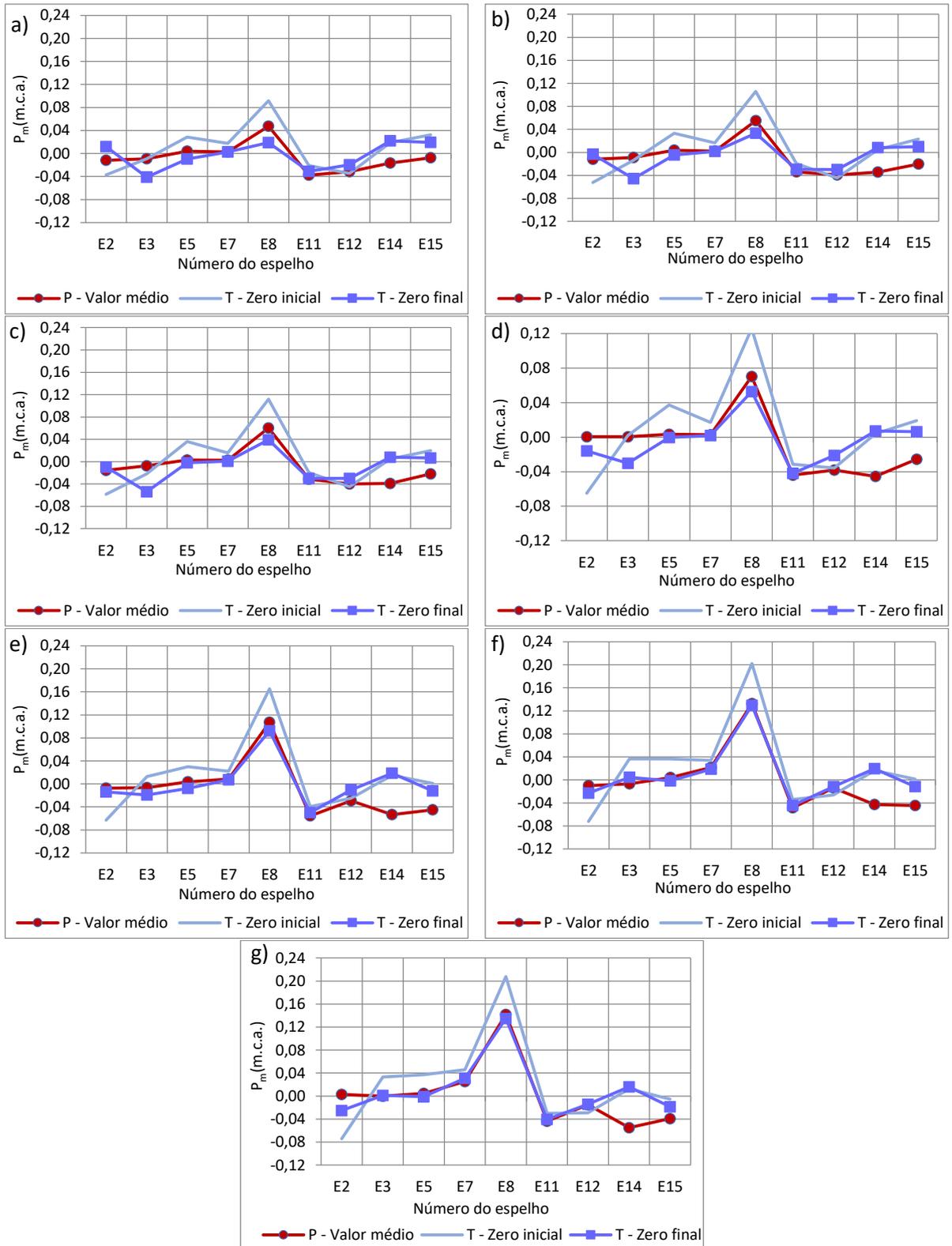


Figura 150 - Comparação valores de pressões médias obtidas por pizômetros e transdutores de pressão para os espelhos dos degraus do modelo LAHE com defletor de 18 mm para as vazões (a) 0,100 m³/s/m, (b) 0,125 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,225 m³/s/m, (f) 0,330 m³/s/m, (g) 0,355 m³/s/m.

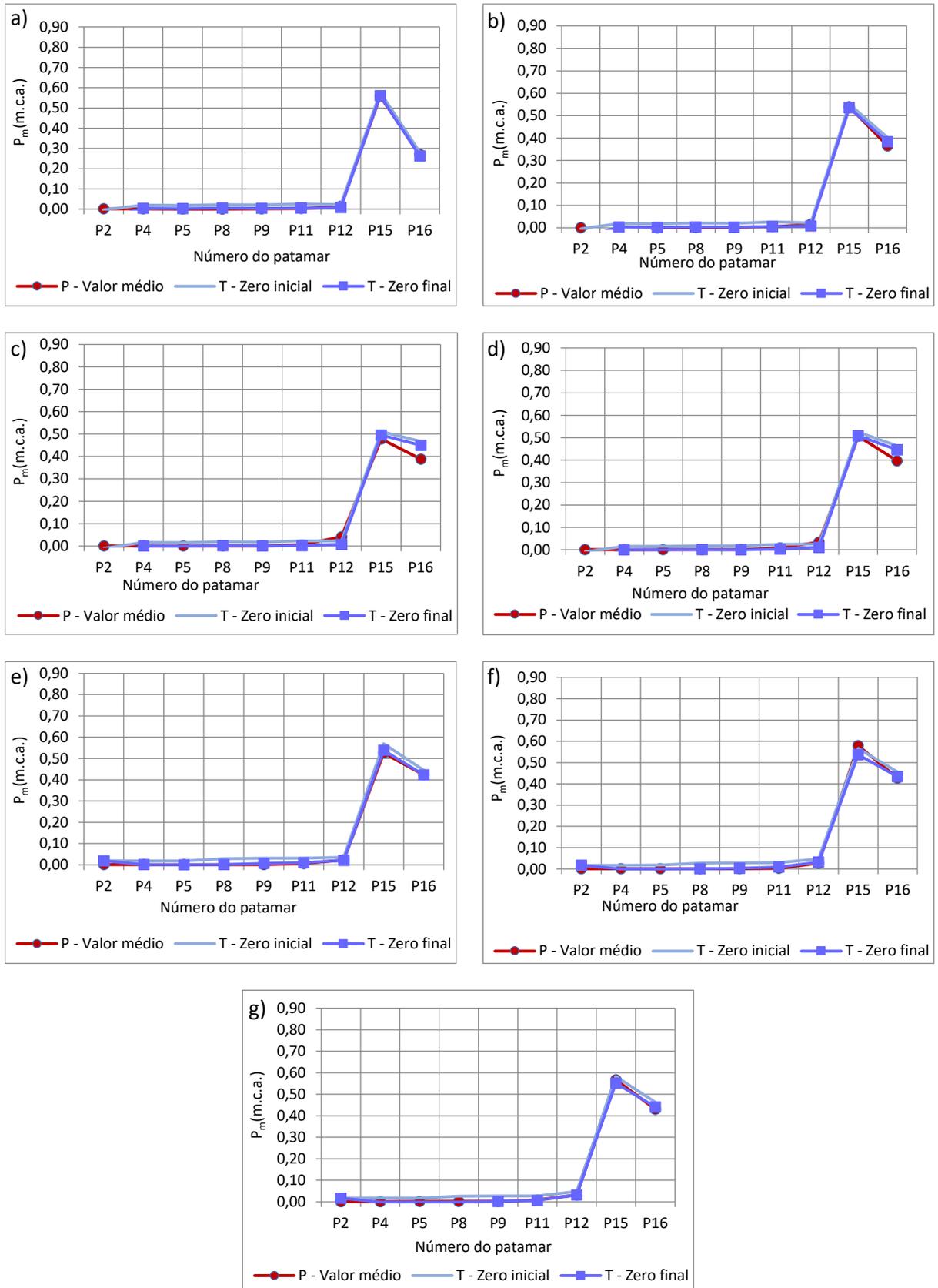


Figura 151 - Comparação valores de pressões médias obtidas por pizômetros e transdutores de pressão para os patamares dos degraus do modelo LAHE com defletor de 27 mm para as vazões (a) 0,100 $m^3/s/m$, (b) 0,125 $m^3/s/m$, (c) 0,150 $m^3/s/m$, (d) 0,200 $m^3/s/m$, (e) 0,225 $m^3/s/m$, (f) 0,330 $m^3/s/m$, (g) 0,355 $m^3/s/m$.

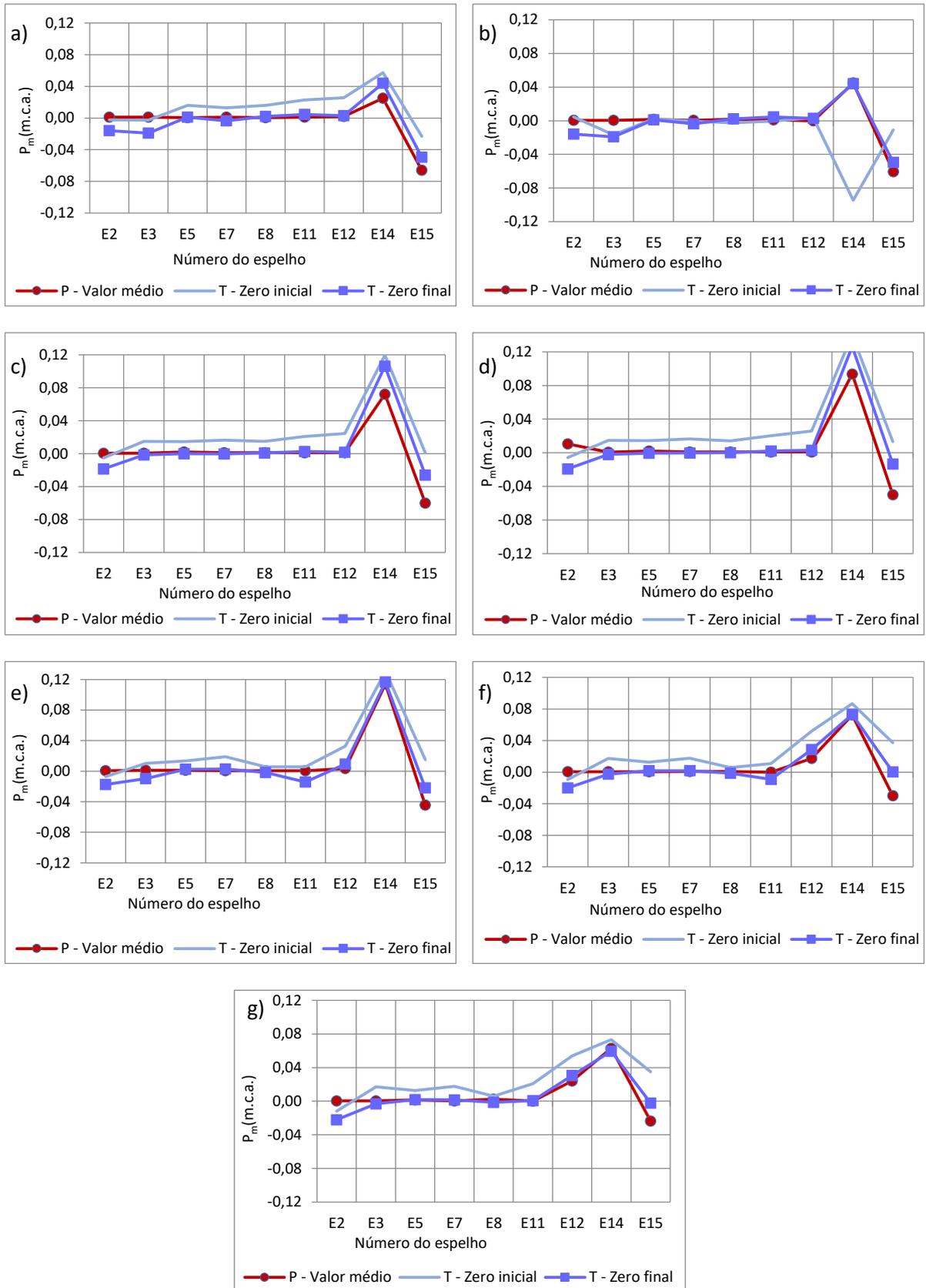


Figura 152 - Comparação valores de pressões médias obtidas por pizômetros e transdutores de pressão para os espelhos dos degraus do modelo LAHE com defletor de 27 mm para as vazões (a) $0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (b) $0,125 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (c) $0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (d) $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (e) $0,225 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (f) $0,330 \text{ m}^3/\text{s/m}$, (g) $0,355 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

APENDICE F – ENSAIOS PRELIMINARES PARA VERIFICAÇÃO DA UTILIZAÇÃO DO TUBO DE PITOT-PRANDTL E TEMPO DE ENSAIO

Os equipamentos disponíveis para as medições de velocidade de entrada de ar pela câmara de ar foram: um tubo de Pitot Prandtl com transmissor de pressão diferencial e um anemômetro de hélice (Figura 153 e Figura 154). O anemômetro de hélice é um equipamento não indicado para pesquisas científicas nas quais se necessita segurança e precisão na medida. O erro associado à esse equipamento é desconhecido além de, no caso do presente trabalho, apenas existe a possibilidade de colocá-lo abaixo da tubulação, onde o escoamento ainda não está plenamente desenvolvido. Contudo sua utilização é importante para confirmação da tendência de comportamento do escoamento nas investigações iniciais. O tubo de Pitot-Prandtl é um equipamento de uso consagrado e bastante difundido na área acadêmica e tecnológica, porém, o erro fornecido pelo fabricante, associado ao transmissor de pressão diferencial (da ordem de 0,05 a 0,10 m.c.a.) é superior à ordem de grandeza dos parâmetros medidos no escoamento. Sendo assim, além de serem realizadas medições com ambos os equipamentos, foram realizados diversos testes com o tubo de Pitot-Prandtl para investigação da sua confiabilidade e faixa de aplicação.

Inicialmente, os dois equipamentos foram testados separadamente nas posições indicadas na Figura 155. Os ensaios com tubo de Pitot foram realizados com tempo de aquisição de 1 minuto e frequência de 100 Hz. Anteriormente ao ensaio de cada vazão era aquiritada uma amostra de valores sem a passagem do escoamento pela calha (zero do Pitot) que é subtraído dos valores aquiritados durante a passagem do escoamento. O Anemômetro de hélice era colocado abaixo da tubulação pelo tempo necessário a um observador identificar a média dos valores apontados pelo equipamento.



Figura 153 – Tubo de Pitot Prandtl com transmissor de pressão



Figura 154 – Anemômetro de hélice

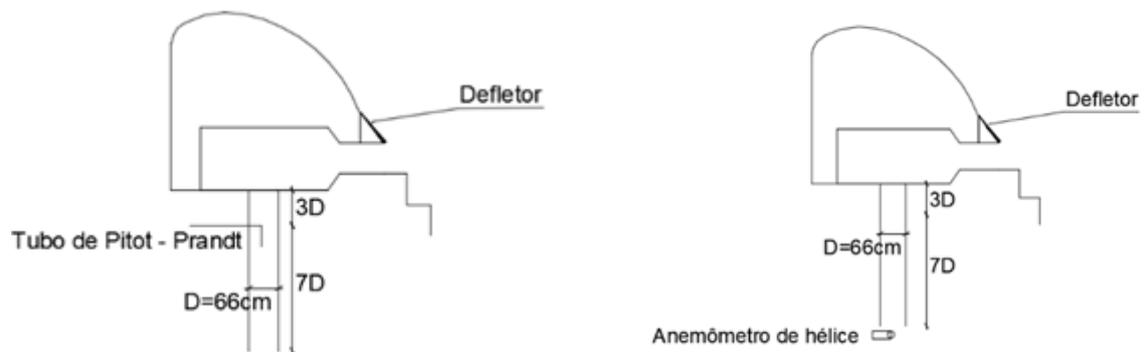


Figura 155 – Posição de medição de cada equipamento testado para aquisição da velocidade média de entrada de ar pela câmara de ar.

A Figura 156 apresenta os resultados das medições de velocidade de entrada de ar pela câmara de ar com o tubo de Pitot-Prandtl e com o anemômetro de hélice, que foram testados para todas as vazões testadas no modelo LOH II com exceção da vazão de $0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, pois houve um problema na bomba durante esses ensaios e a maior vazão foi substituída pela vazão de $0,436 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Pode-se perceber que o anemômetro de hélice resulta em maiores velocidades, porém o comportamento segue os mesmos padrões dos obtidos pelo tubo de Pitot, o que representa um indício do adequado funcionamento do aparelho. Acredita-se que essa diferença pode existir em função da diferença no posicionamento dos equipamentos. A Figura 157 apresenta o perfil do escoamento de ar levantado para a vazão de $0,082 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ de duas formas, primeiramente da esquerda para a direita e posteriormente da direita para a esquerda. Nota-se que os resultados de velocidade de entrada de ar são semelhantes nas duas medições, o que indica uma adequada precisão do equipamento. Além disso, a Figura 158 apresenta os resultados dos ensaios que foram realizados em dias diferentes para todas as vazões. Em um dos dias, os ensaios foram repetidos variando as vazões em ordem crescente, depois decrescente. Como todas as medições resultaram um comportamento e magnitudes de velocidade

semelhante, concluiu-se que o tubo de Pitot-Prandtl possui precisão adequada para a presente pesquisa. Ademais o tubo de Pitot foi aferido em um túnel de vento com escoamento controlado existente no Laboratório de Mecânica dos Fluidos, apresentando valores suficientemente próximos (Figura 159), o que indica que o aparelho apresenta uma exatidão adequada, apesar de o transmissor de pressão estar atuando em uma faixa dentro do erro indicado pelo fabricante.

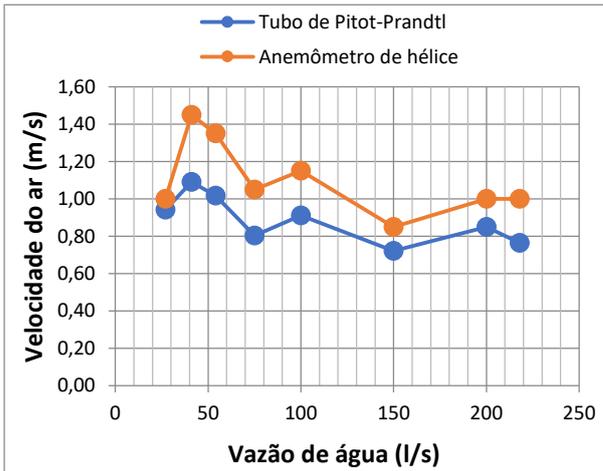


Figura 156 – Comparação dos resultados do tubo de Pitot e anemômetro de hélice.

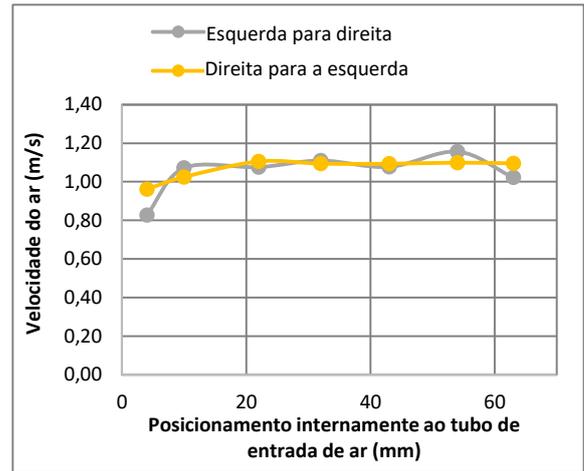


Figura 157 – Perfil do escoamento de ar medido da esquerda para a direita e da direita para a esquerda

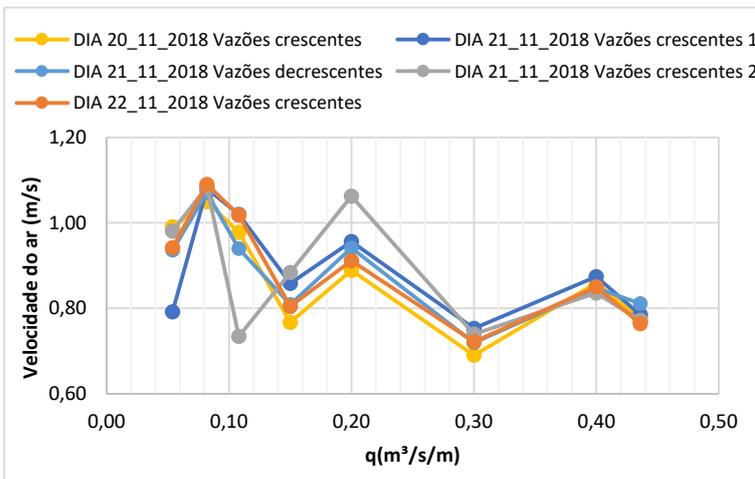


Figura 158 – Resultados do tubo de Pitot em dias diferentes e com vazões crescentes e decrescentes.

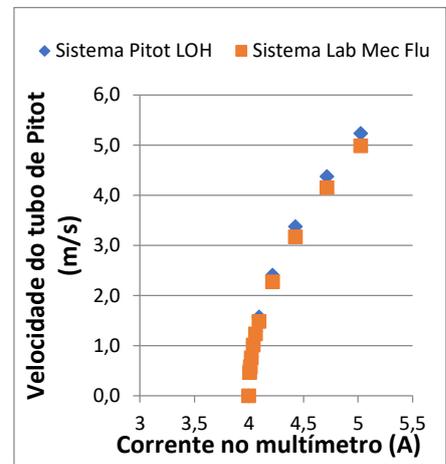


Figura 159 – Comparação dos resultados do tubo de Pitot do LOH e do laboratório de mecânica dos Fluidos.

Para definição do tempo de aquisição de dados com o tubo de Pitot-Prandtl, foi realizado um ensaio com vazão de 0,4 m³/s/m (por ter se verificado que vazões maiores são mais críticas) com uma hora de duração, também com o defletor t10 b0. Foi identificada uma redução significativa nas velocidades em função do tempo, entre o início e o final do ensaio, as velocidades variaram de 0,71 m/s e 0,47 m/s (Figura 160), indicando que um tempo muito alto de aquisição poderia prejudicar as medições.

Verificou-se que isso ocorre devido ao zero do aparelho sofrer alterações com o passar do tempo.

Estabeleceu-se, como parâmetro, que as velocidades não poderiam decair mais do que 10% da velocidade inicial. Verificou-se que é o tempo de aquisição correspondente a esse decréscimo é de 15 min. Dessa forma, o tempo de aquisição dos transdutores de pressão (10 min) está dentro da faixa aceitável e, como as duas aquisições foram realizadas concomitantemente, decidiu-se utilizar o mesmo tempo (10 min) também para a aquisição de dados de velocidade.

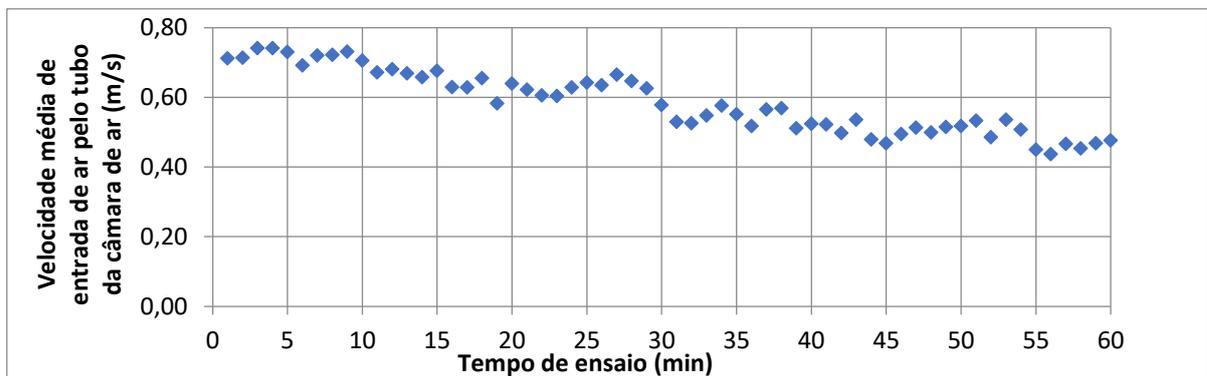


Figura 160 – Velocidade média de entrada de ar pelo tubo da câmara de ar (m/s).

APENDICE G – DEDUÇÃO DA EQUAÇÃO UTILIZADA PARA ESTIMATIVA DA CONCENTRAÇÃO DE AR NA ZONA DE BLACKWATER

Essa metodologia consiste em considerar que toda a vazão de ar que entra pela câmara de ar se distribui na porção inferior do escoamento no qual se visualiza uma separação bem definida entre a porção aerada e o núcleo de blackwater, como mostra a Figura 161. Essa consideração é justificada pelo fato de não haver trocas significativas entre o ar que entra pela câmara e a superfície livre do escoamento, devido à porção aerada estar isolada da superfície livre pelo núcleo de blackwater.

Pode-se descrever a concentração de ar em um escoamento através da Equação 75.

$$C_a = 1 - \frac{h_{eq}}{h_{aer}} \quad \text{Equação 75}$$

Onde: C_a = concentração média de ar; Q_{ar} = vazão de ar que entra pela câmara de ar (m^3/s); Q_{ag} = vazão de água do escoamento (m^3/s); h_{eq} = altura equivalente correspondente a altura apenas de água no escoamento aerado (m^3/s); h_{aer} = altura da lâmina d'água do escoamento aerado (m).

Considerando-se a situação da Figura 161, pode-se escrever a Equação 76, que é derivada da equação da massa. Admite-se que a velocidade do ar é igual à velocidade da água e também que a introdução de ar não altera significativamente a velocidade do escoamento. Além disso, a inserção de ar pela superfície livre superior pode ser desprezada.

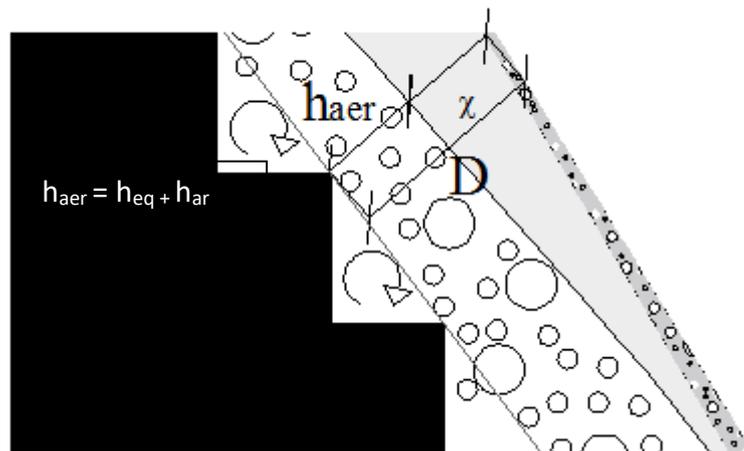


Figura 161 – Distribuição da concentração de ar no escoamento na zona de Blackwater

$$Q_{ag}(h_{aer} - h_{eq}) = Q_{ar}(h_{eq} + \chi) \quad \text{Equação 76}$$

Onde Q_{ag} = vazão total de água do escoamento (m^3/s); Q_{ar} = vazão de ar no escoamento (m^3/s); χ = altura da lâmina d'água do núcleo de blackwater (m); h_{eq} = altura equivalente correspondente a altura apenas de água no escoamento aerado (m); h_{aer} = altura da lâmina d'água do escoamento aerado (m).

Utilizando-se a Equação 75 na Equação 76 e isolando-se a concentração de ar tem-se a Equação 72.

$$C_{a,inf} = \frac{D}{\left(\frac{Q_{ag}}{Q_{ar}} + 1\right) h_{aer}} \quad \text{Equação 77}$$

Onde: $C_{a,inf}$ = concentração de ar na lâmina inferior do escoamento; $D = h_{aer} + \chi$ (m); Q_{ag} = vazão total de água do escoamento (m^3/s); Q_{ar} = vazão de ar no escoamento (m^3/s); h_{aer} = altura da lâmina d'água do escoamento aerado (m^3/s).

APENDICE H – RELAÇÃO ENTRE PRESSÕES MÉDIAS NOS PATAMARES DOS DEGRAUS COM A ALTURA DA LÂMINA D'ÁGUA DO ESCOAMENTO

Para a aplicação do método relação $P \times h_{naer}$, é necessário que se relacionem as pressões desenvolvidas nos patamares dos degraus submetidos a escoamento com aeração natural na zona não aerada com a altura da lâmina d'água desenvolvida no ponto em questão para, posteriormente, calcularmos a altura equivalente do escoamento com aeração induzida mesmo na zona aerada. Sendo assim, foram medidas as alturas do escoamento nas mesmas posições onde existem medições de pressões através de fotos e vídeos registrados durante a realização dos ensaios (Figura 162) Para a elaboração da equação foram testadas três diferentes adimensionalizações para os dados (Equação 78, Equação 79 e Equação 80)

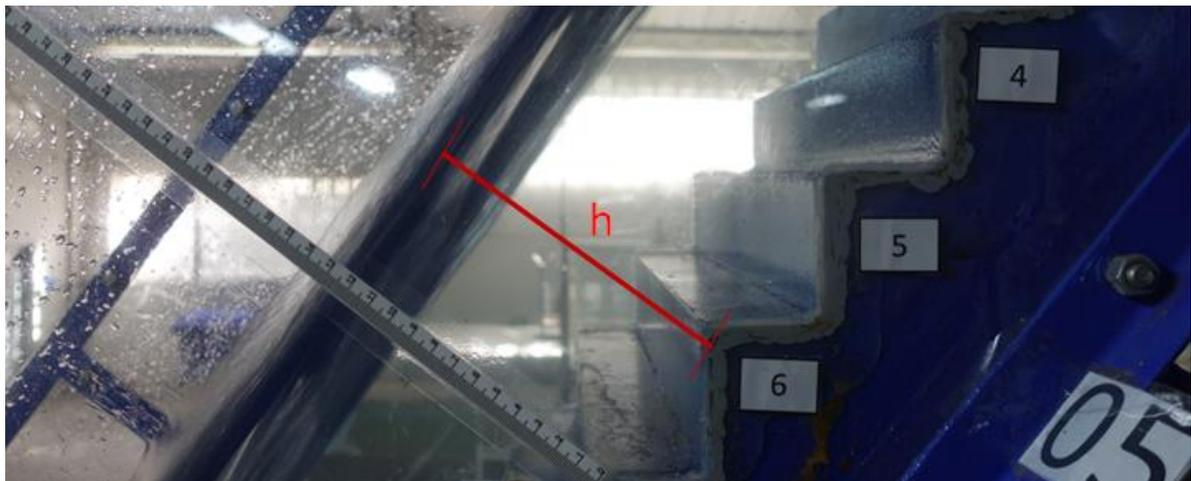


Figura 162 – medição das alturas de lâmina d'água no escoamento com aeração natural na zona não aerada.

$$f\left(\frac{P_m}{h_c}\right) = \frac{h}{k} \quad \text{Equação 78}$$

$$f\left(\frac{P_m}{h_o}\right) = \frac{h}{k} \quad \text{Equação 79}$$

$$f\left(\frac{P_m h_d}{h_c h_c}\right) = \frac{h}{k} \quad \text{Equação 80}$$

Onde: P_m = pressões médias medidas; h = altura do escoamento no ponto de interesse; h_c = altura crítica do escoamento; h = altura da lâmina d'água do escoamento; k = macro rugosidade do degrau; h_o = altura da lâmina d'água no final da ogiva; h_d = altura do degrau.

A Equação 80 pode ser escrita na sua forma simplificada (Equação 81).

$$f\left(\frac{P_m h_d}{h_c^2}\right) = \frac{h}{k} \quad \text{Equação 81}$$

Os resultados das três adimensionalizações estão apresentados na Figura 163 já com a equação ajustada e o coeficiente R^2 .

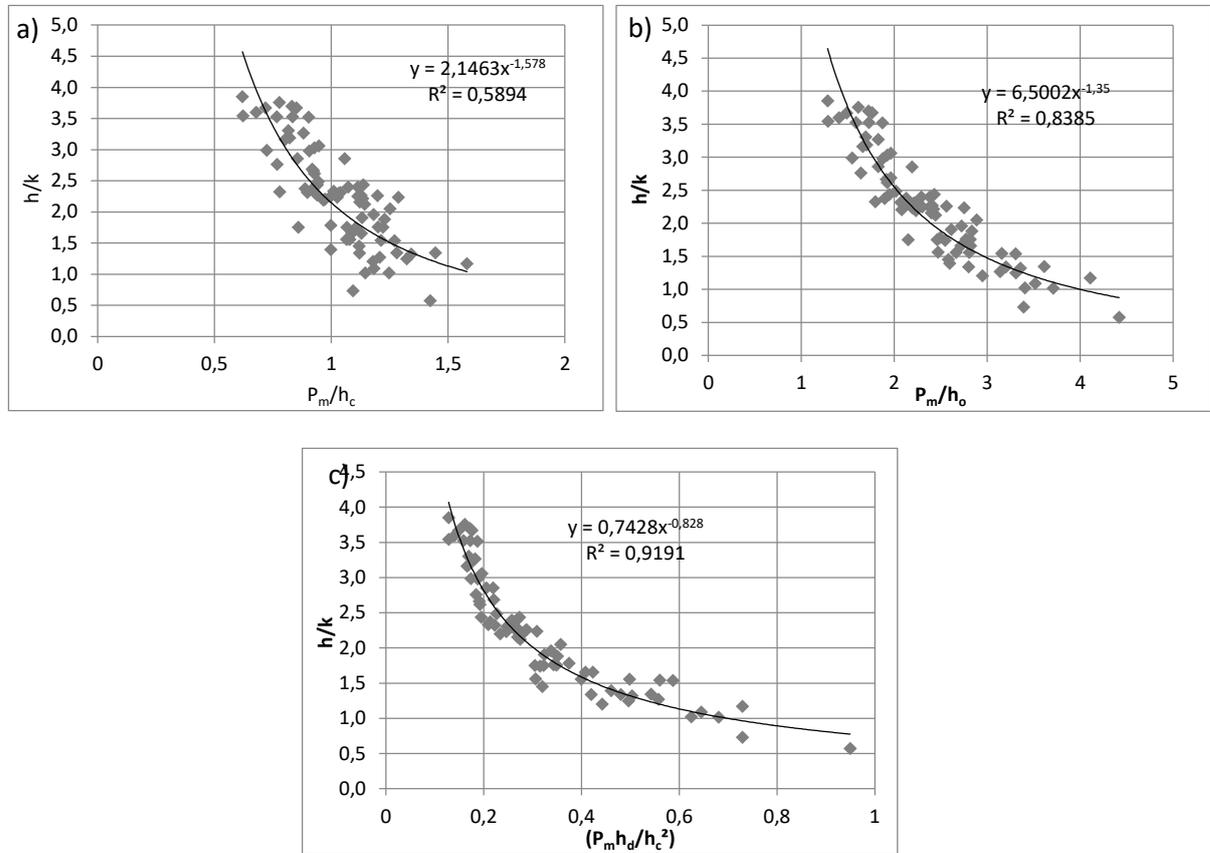


Figura 163 – Relação entre as pressões médias nos patamares dos degraus e a altura da lâmina d'água com as três adimensionalizações testadas.

Percebe-se que a adimensionalização da Equação 81 parece agrupar melhor os dados resultando na equação com melhor R^2 . Porém, com o objetivo de selecionar a equação mais adequada para o estudo foram realizados mais alguns estudos. Foram plotadas, para cada vazão ensaiada, o valor medido, através dos vídeos e das fotografias, e os valores referentes, calculados por cada equação representada na Figura 163 identificadas pela adimensionalização referente utilizadas para a pressão. Na Figura 164 estão apresentados os resultados obtidos para todas as vazões ensaiadas onde pode-se visualizar que, de forma geral, os resultados de altura de lâmina d'água calculados através da equação obtida com a adimensionalização da Equação 81 possuem valores mais próximos aos medidos para a maior parte da calha.

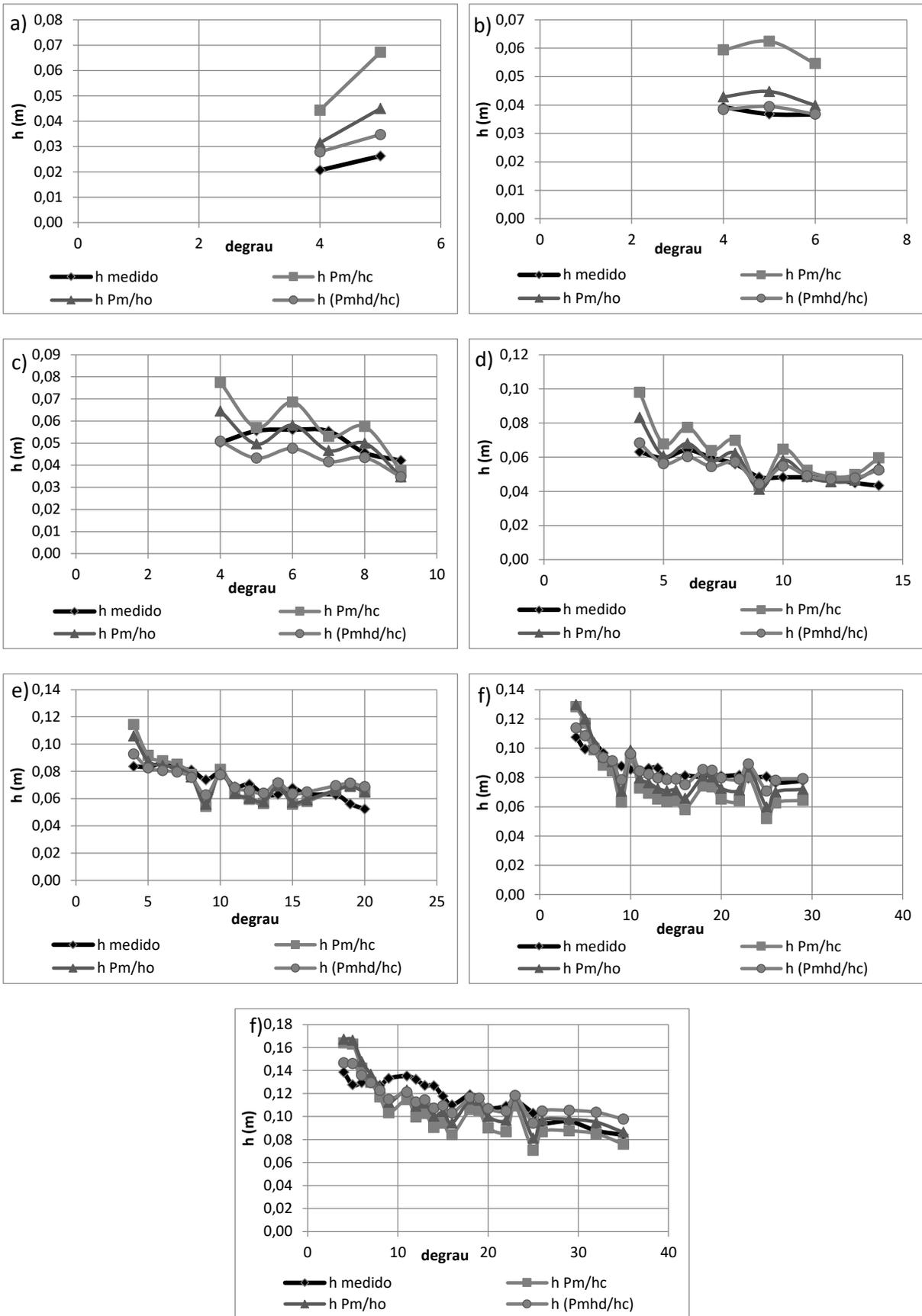


Figura 164 - Comparação entre h medido e h calculado com as diferentes adimensionalizações para as vazões ensaiadas: a) 41 l/s; b) 54 l/s; c) 75 l/s; d) 100 l/s; e) 150 l/s e f) 200 l/s e g) 250 l/s.

Além disso, foi realizada uma análise de erro dos valores calculados com cada uma das equações apresentadas na Figura 163 (Equação 82). Os resultados dos erros calculados para cada equação encontram-se na Figura 165 identificados pela adimensionalização referente. Na Figura 165a estão representados os resultados de forma completa e na Figura 165b está representado um detalhe na região onde os erros atingem valor máximo de 40% para permitir uma melhor visualização dos dados na região com maior número de dados. Pode-se perceber que a adimensionalização $P_m h_d / h_c^2$ representa, de forma geral, erros menores, exceto por alguns pontos específicos, o que, como esperado, coincide com os resultados da análise da Figura 164, estando, a maioria dos valores inferiores a 15%. Sendo assim, devido às análises apresentadas nesse apêndice, optou-se por utilizar, para a aplicação do método $P_x h_{naer}$, a equação resultante da aplicação da adimensionalização $P_m h_d / h_c^2$ (Equação 83)

$$erro = 100 \times \frac{|h_{calc} - h_{med}|}{h_{med}} \tag{Equação 82}$$

h_{calc} = altura da lâmina d'água calculada pelas equações da Figura 163; h_{med} = altura da lâmina d'água medida através de fotografias e vídeos.

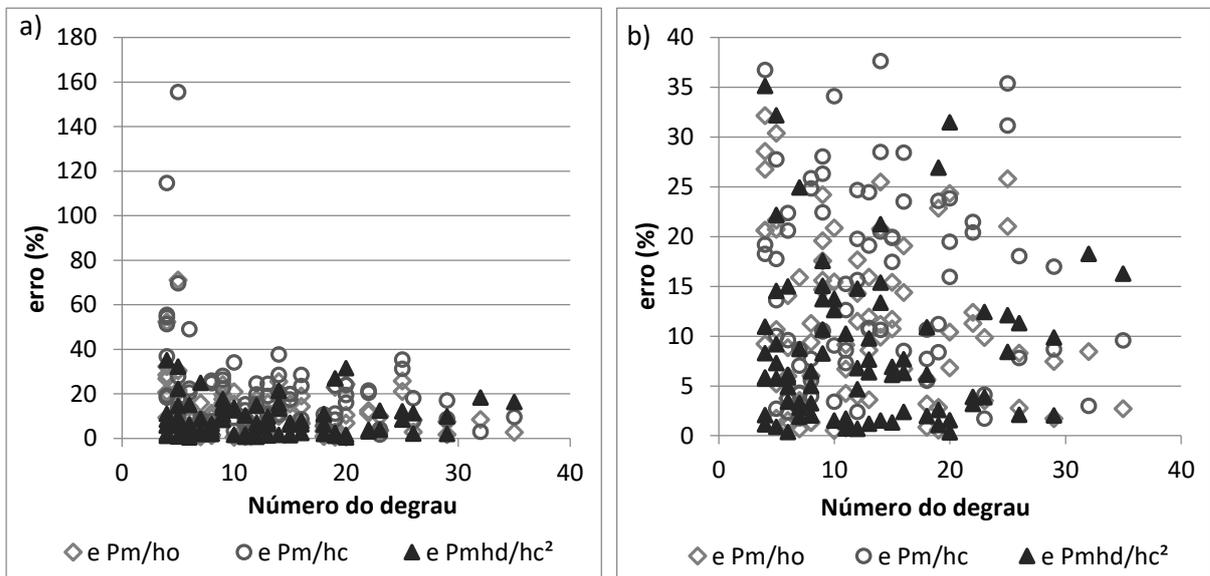


Figura 165 – erros calculados para as adimensionalizações testadas, a) de forma completa; b) detalhe na região de erros com valores máximos de 40%.

$$\frac{h}{k} = 0,7428 \times \left(\frac{P_m h_d}{h_c^2} \right)^{-0,828} \tag{Equação 83}$$

APENDICE I – RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DA FORMA DE CÁLCULO DA ENERGIA DE MONTANTE

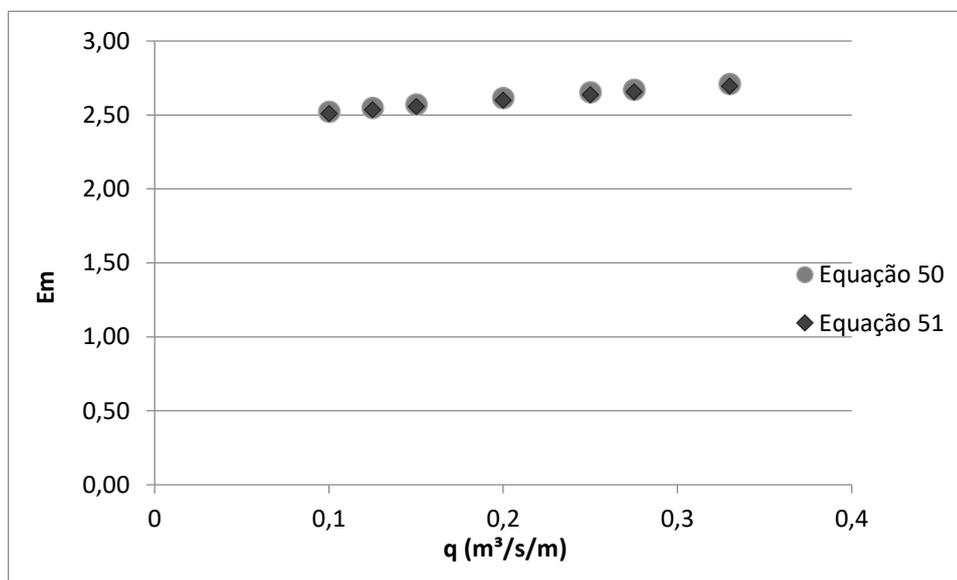


Figura 166 – Energia de montante calculada através da Equação 53 e Equação 62.

APENDICE J – COMPARAÇÃO DISSIPACÃO DE ENERGIA NOS MODELOS LOH I E LOH II

A Figura 167 apresenta a energia dissipada na calha no modelo LOH I (pontos cinzas) comparada com a mesma grandeza obtida para o modelo LOH II calculada no degrau de número 32 (equivalente ao último degrau do modelo LOH I). Estão representados apenas os pontos resultantes de ensaios dentro da mesma faixa de vazões específicas. Percebe-se que as formas de cálculo utilizadas nos modelos LOH I e LOH II resultam em valores semelhantes.

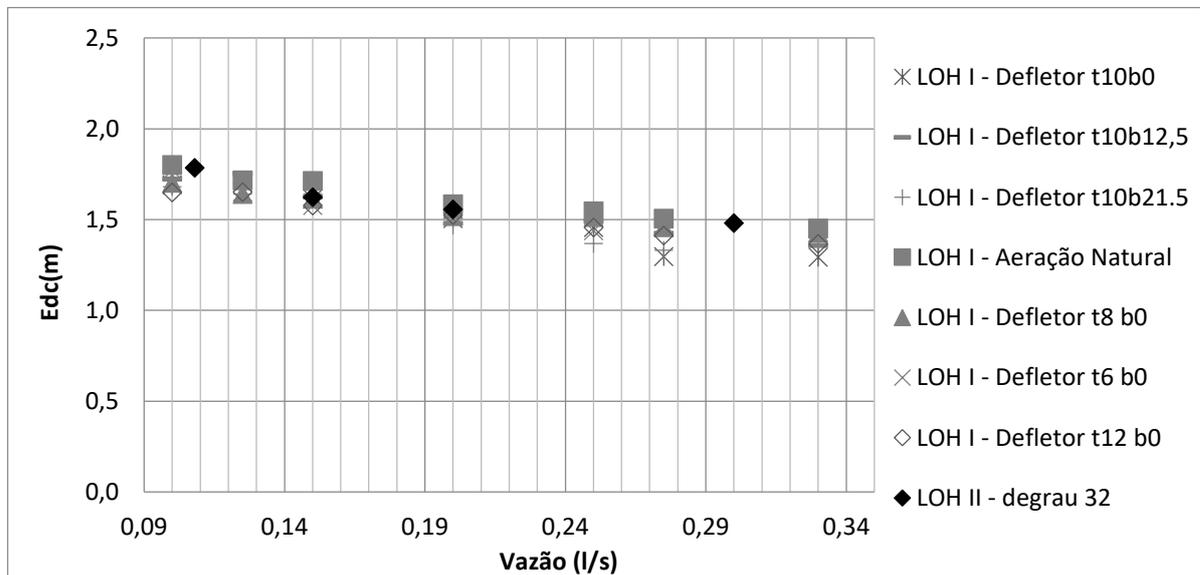


Figura 167 – Energia dissipada na calha no modelo LOH I com dos os defletores e energia dissipada no modelo LOH II com o defletor t10 b0 para o degrau 32.

APENDICE L – RESULTADOS DA INFLUÊNCIA DA VAZÃO NAS PRESSÕES NOS PATAMARES E ESPELHOS DOS DEGRAUS

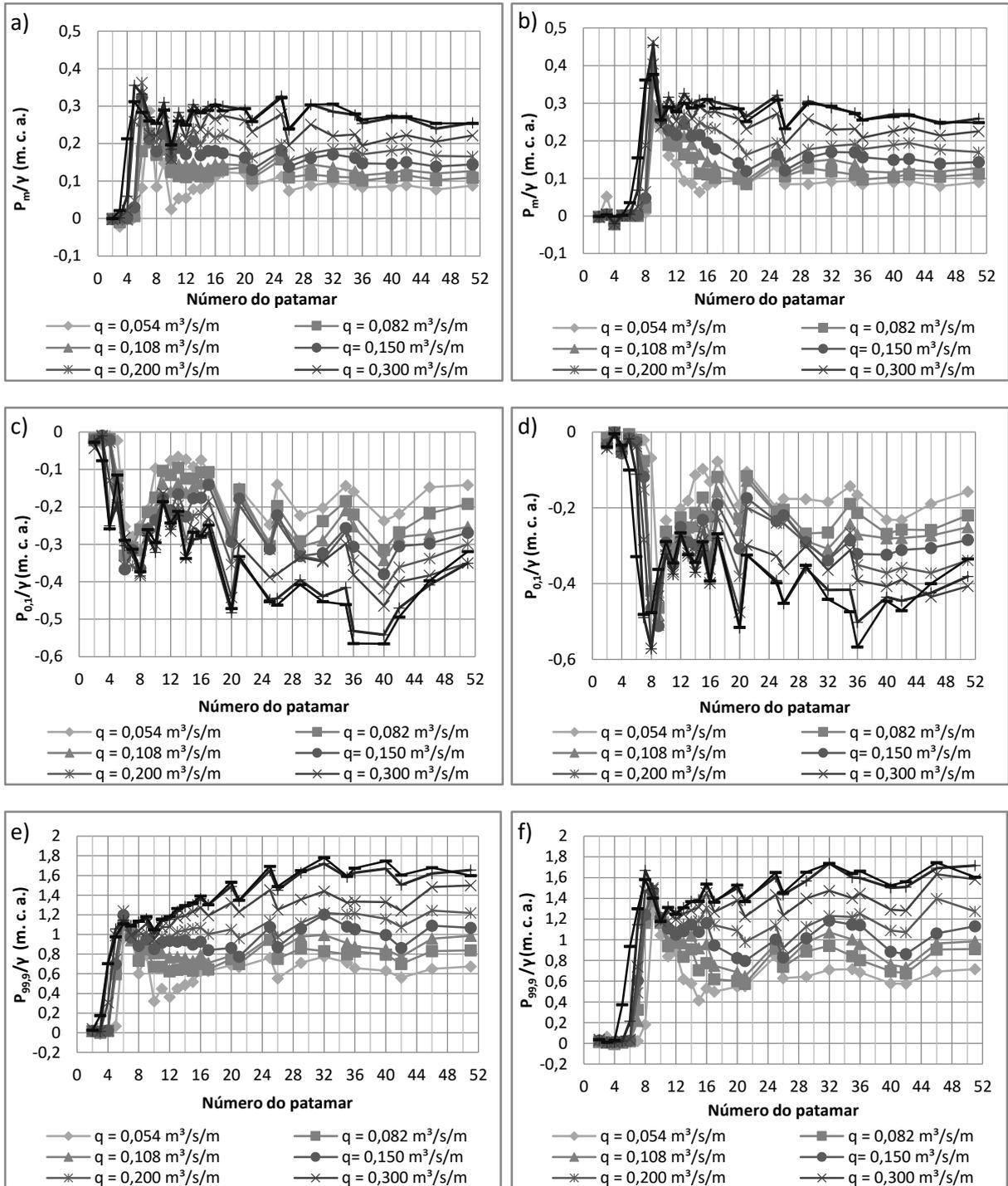


Figura 168 – Pressões desenvolvidas nos patamares dos degraus, (a), (c) e (e) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ e para o defletor t10 b12,5 e (b) (d) e (f) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ para o defletor t10 b21,5.

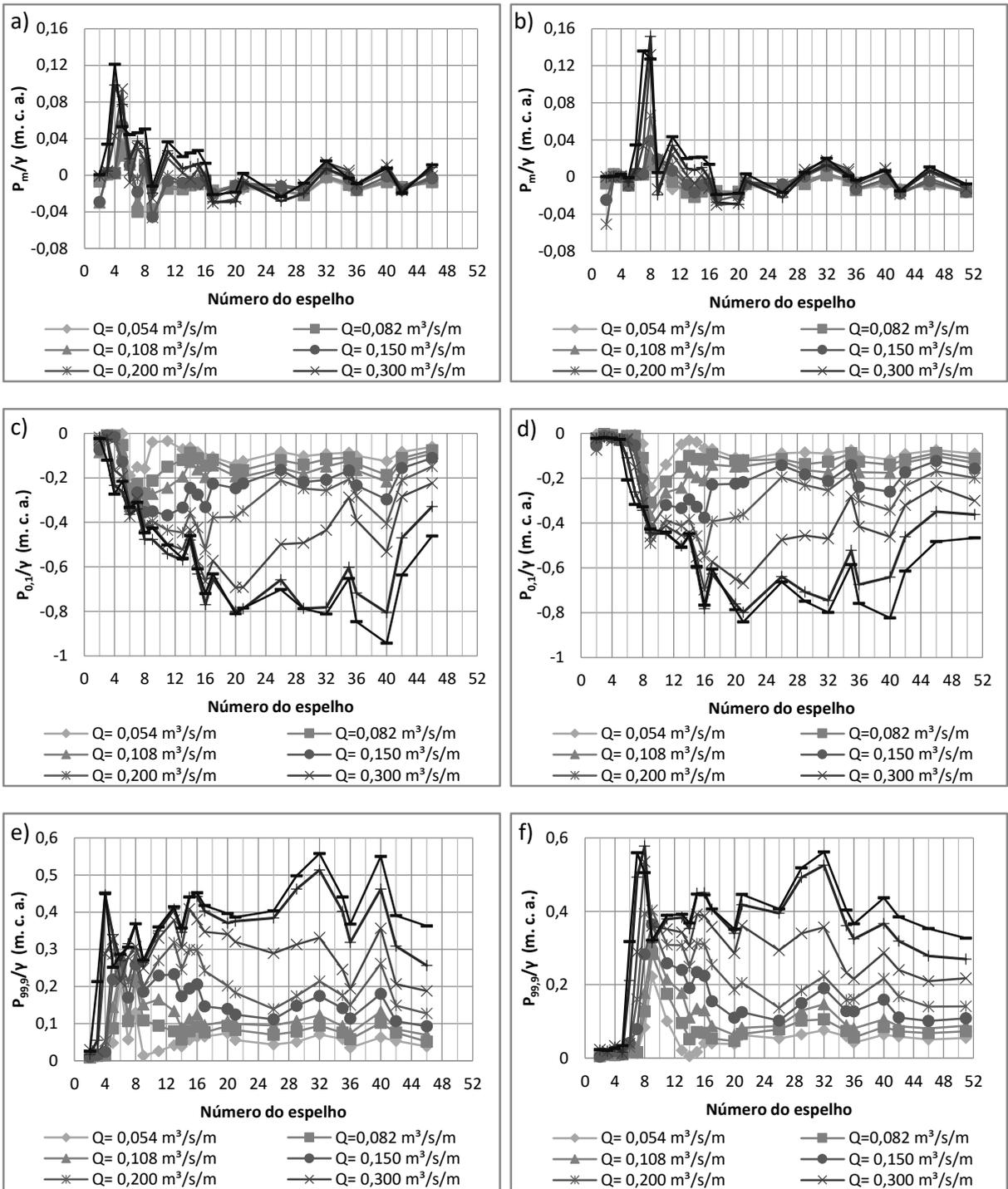


Figura 169 – Pressões desenvolvidas nos espelhos dos degraus, (a), (c) e (e) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ e para o defletor $t10\ b12,5$ e (b) (d) e (f) respectivamente, médias, $P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$ para o defletor $t10\ b21,5$.

APENDICE M – AVALIAÇÃO DA SUBPRESSÃO

De acordo com Pfister (2011), subpressões inferiores a 10% da altura da lâmina d'água de aproximação do escoamento propiciam efeitos desconsideráveis no escoamento. Dessa forma, se a subpressão obtida for inferior a esse valor, pode-se concluir que o percurso da formação do jato no escoamento devido à passagem pelo defletor não sofre influência da subpressão desenvolvida nos degraus abaixo do escoamento. A Figura 170 a mostra a razão entre a subpressão adquirida no patamar do degrau 2, ou seja, a primeira medição possível no degrau abaixo do jato. Percebe-se que todas as pressões encontram-se acima da linha tracejada, que representa o limite da não influência indicado por Pfister (2011), logo, pode-se concluir que a formação do jato não é influenciada pela subpressão. Destaca-se que existe uma diferença entre os valores resultantes dos diferentes defletores, sendo que os valores para o defletor d10b0 são positivos, enquanto os demais são negativos. Porém, como apresentado na Figura 170b, as subpressões são extremamente próximas à zero, com valores que variam entre -0,003 e 0,001 m.c.a., o que torna essa diferença praticamente insignificante. Dessa forma, conclui-se que devido à geometria do sistema aerador, a subpressão não é um parâmetro a ser considerado na análise do desenvolvimento do jato formado.

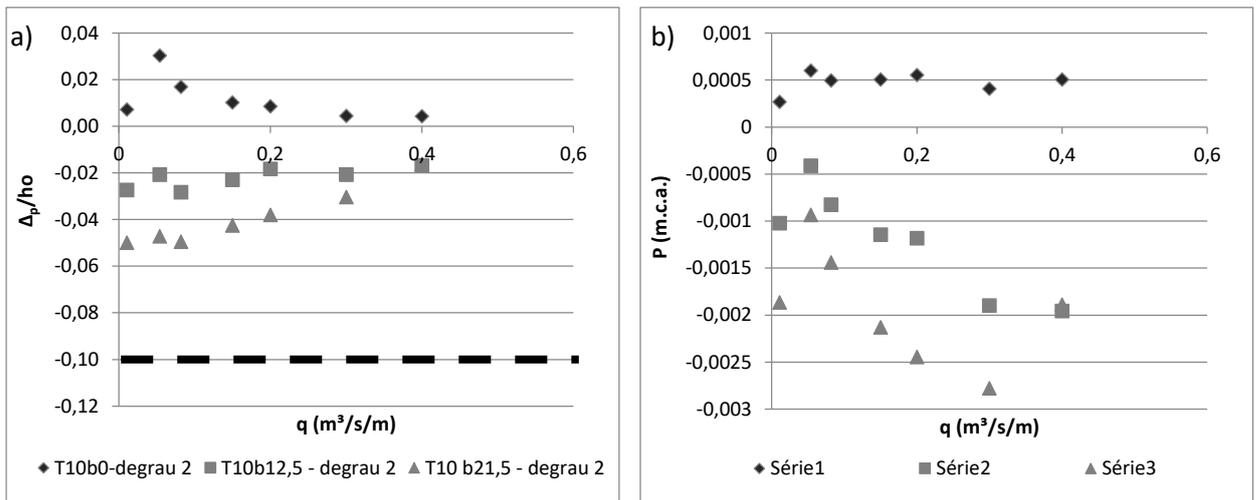
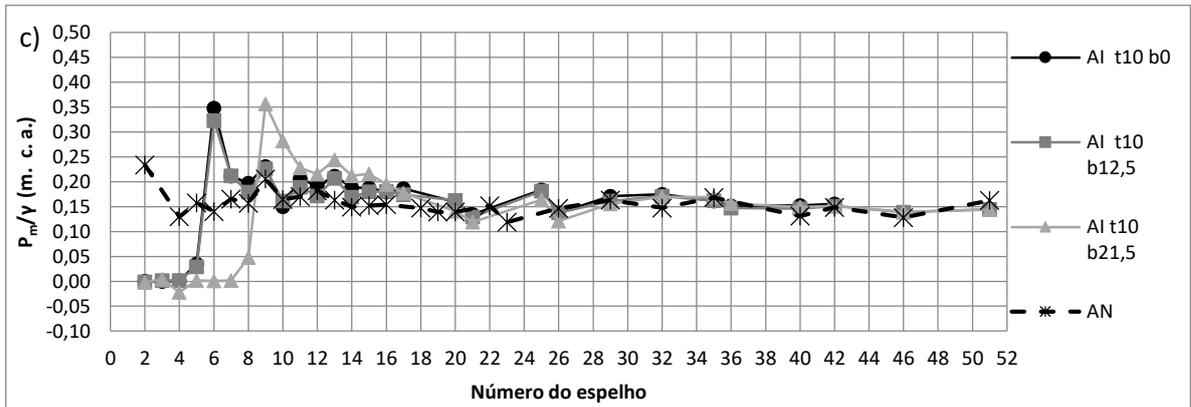
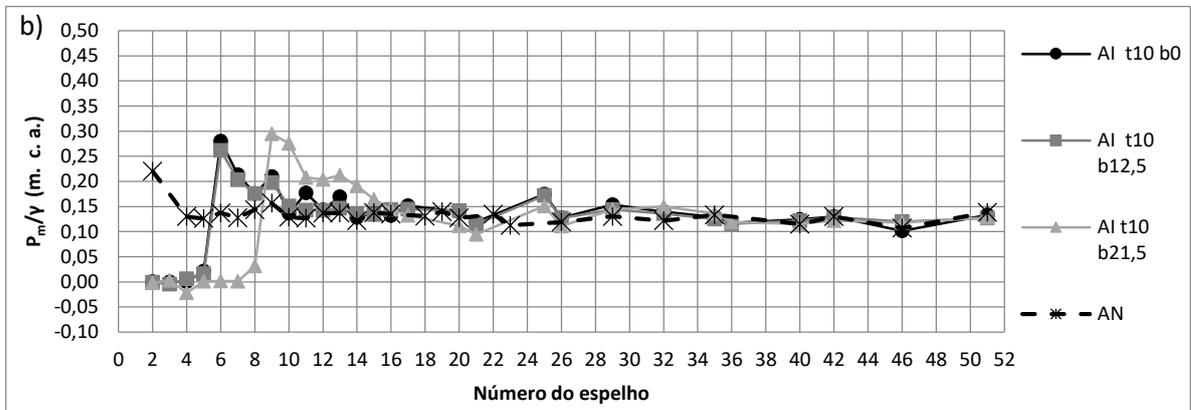
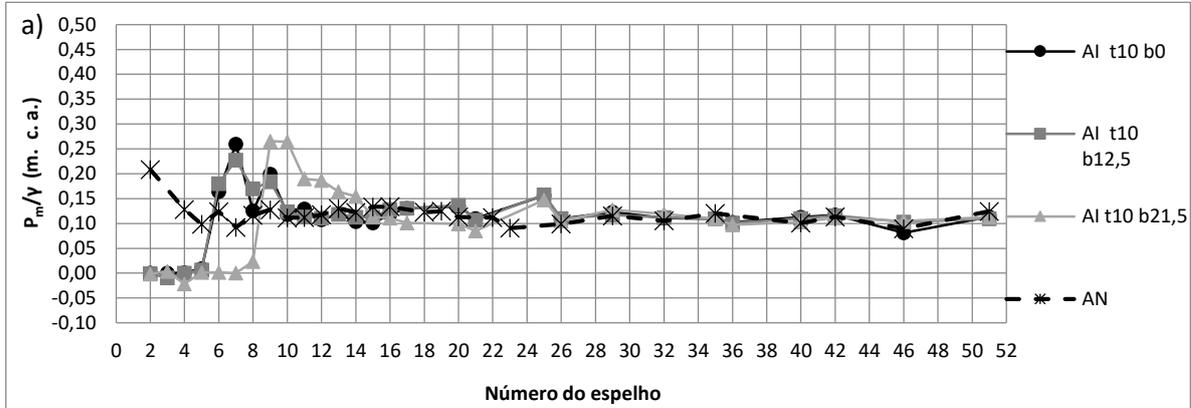


Figura 170 – Relação da subpressão obtida no patamar do espelho 2 com as vazões ensaiadas em valores adimensionais ($\Delta p/h_o$) (a) e em valores dimensionais (b).

APENDICE N – COMPARAÇÃO ENTRE PRESSÕES OBTIDAS COM AERAÇÃO INDUZIDA E NATURAL



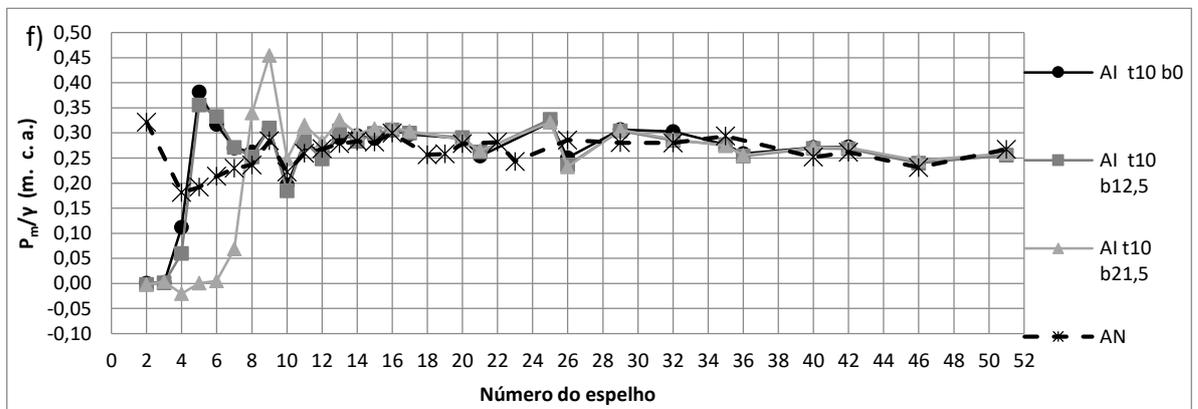
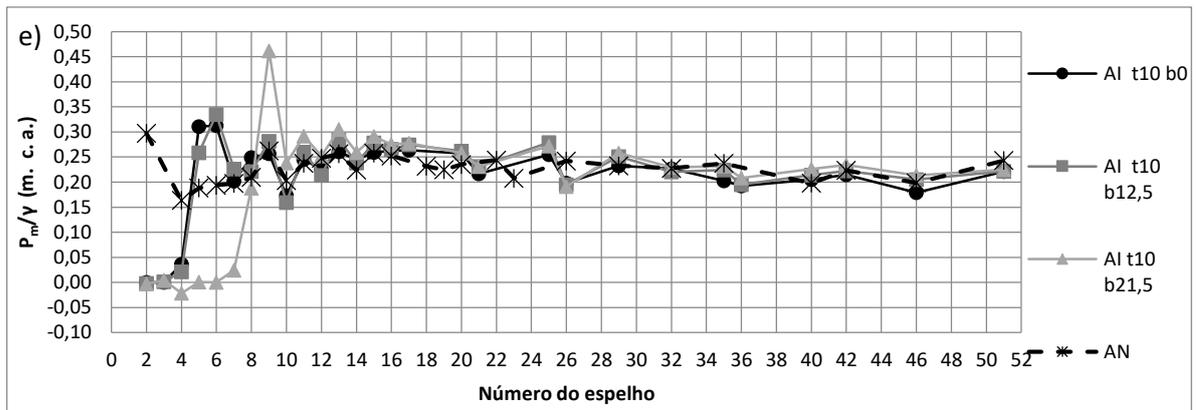
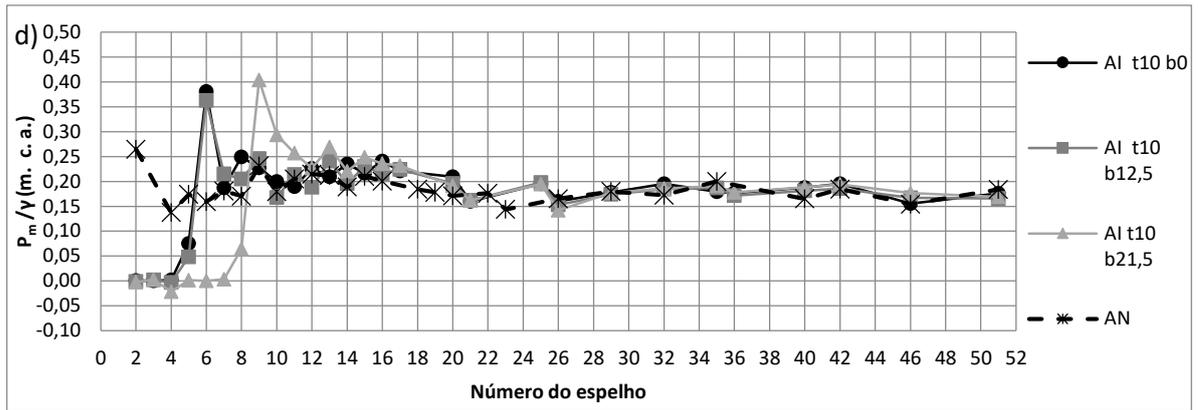
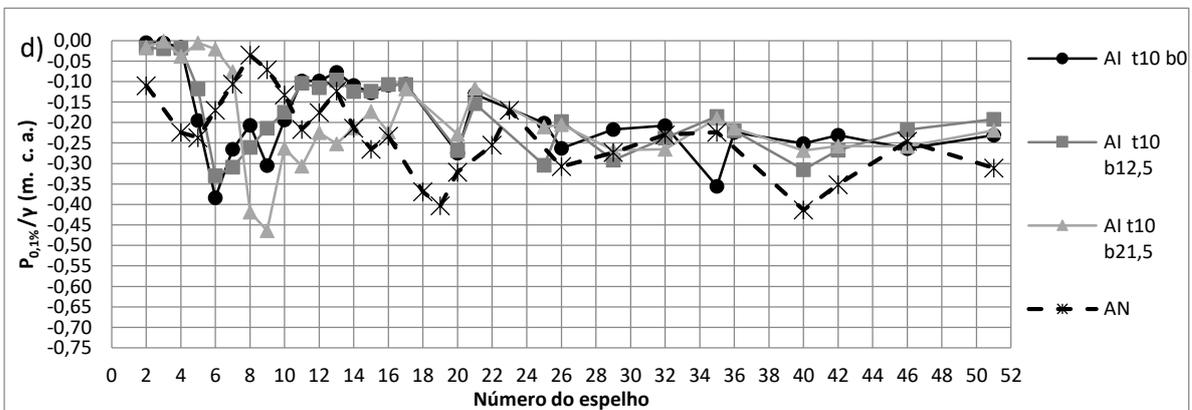
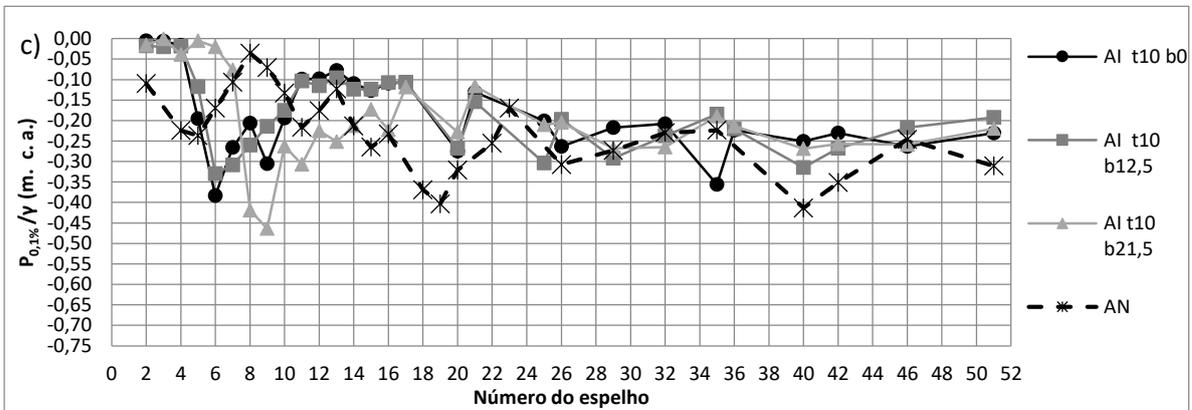
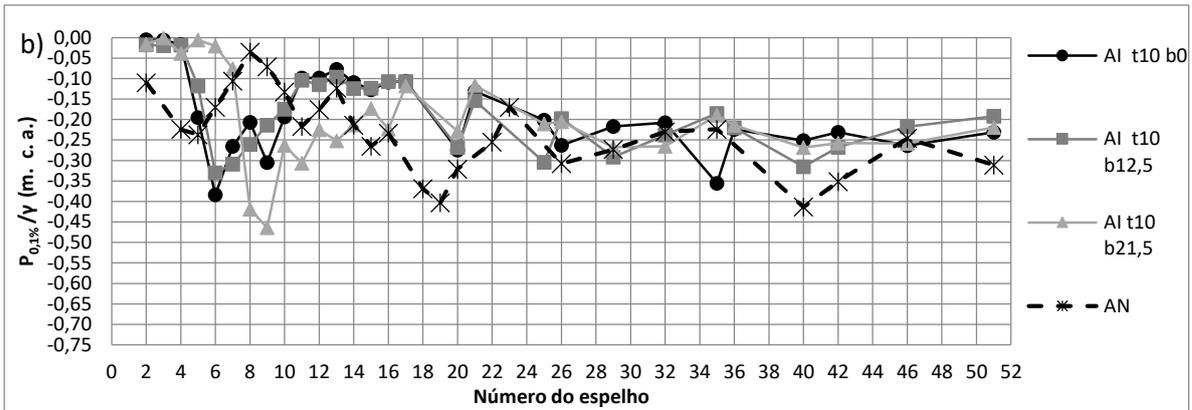
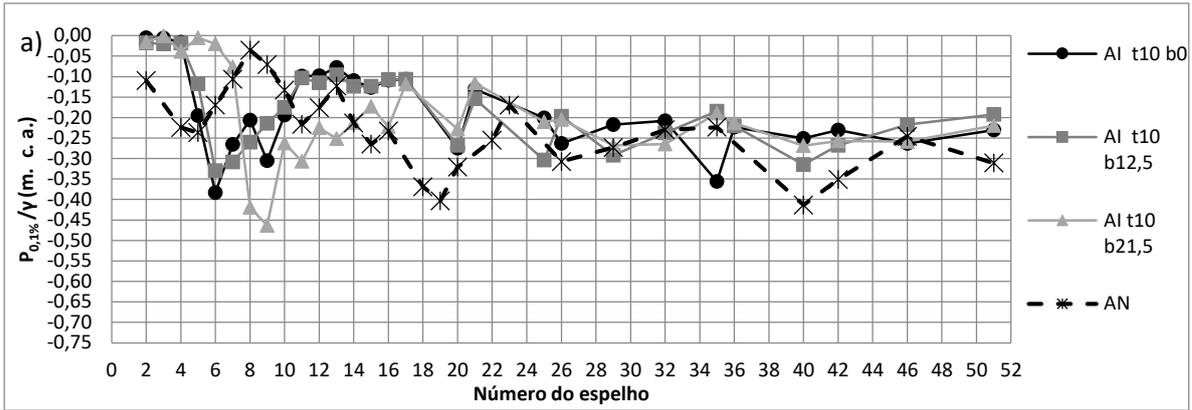


Figura 171 – Pressões médias nos patamares dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m³/s/m, (b) 0,108 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,300 m³/s/m, (f) 0,400 m³/s/m e (g) 0,500 m³/s/m .



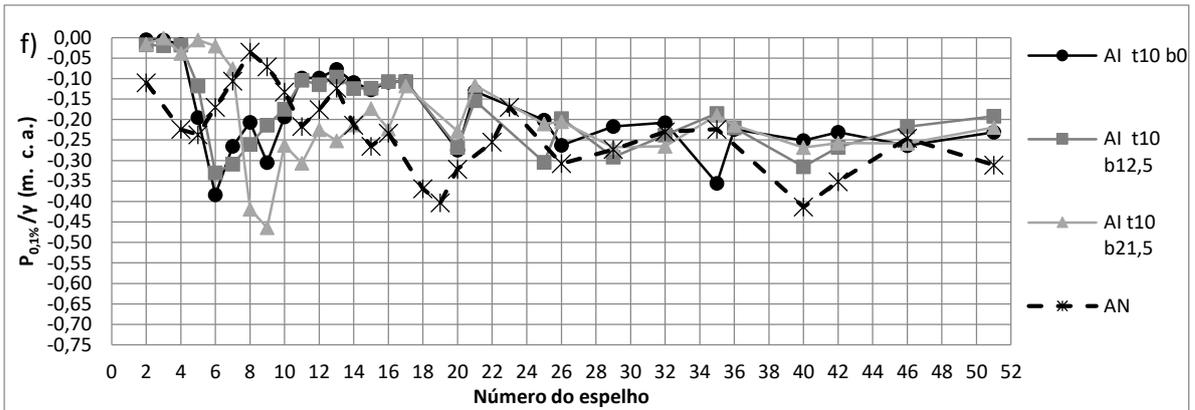
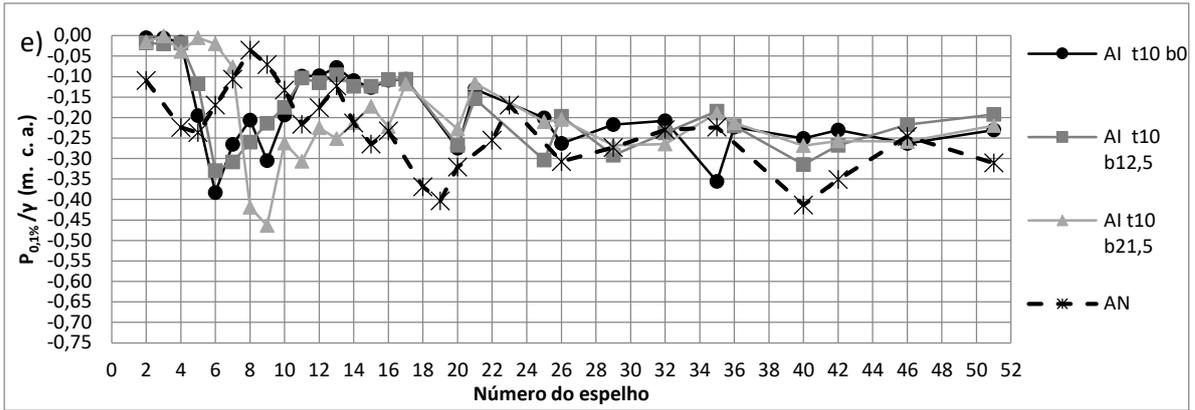
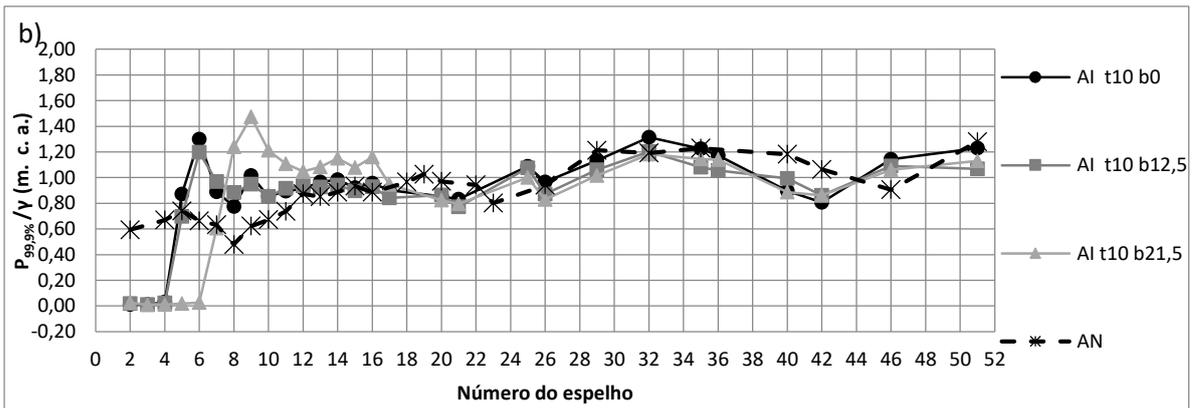
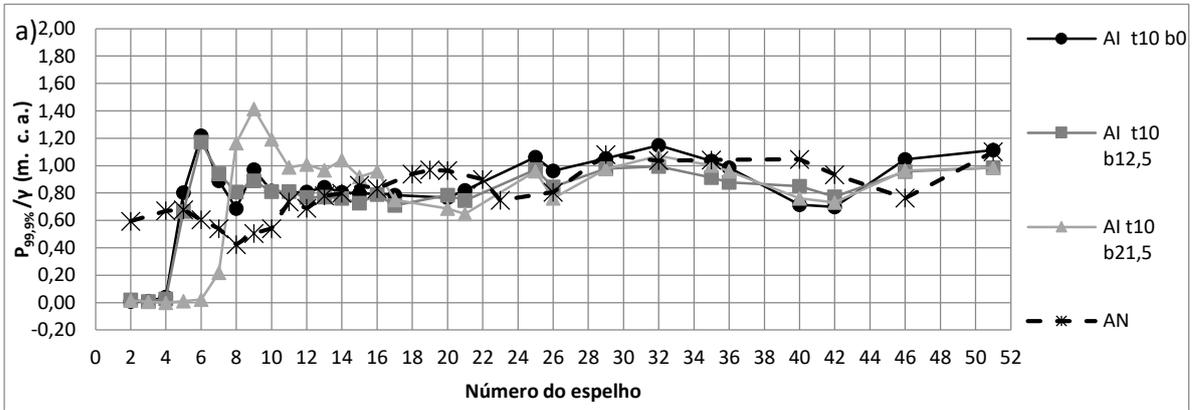


Figura 172 – P01% nos patamares dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m³/s/m, (b) 0,108 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,300 m³/s/m, (f) 0,400 m³/s/m e (g) 0,500 m³/s/m.



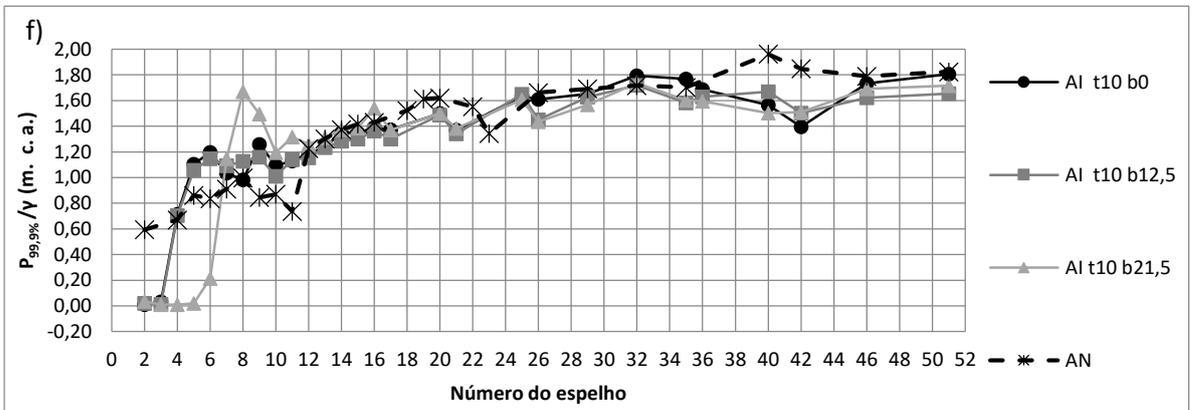
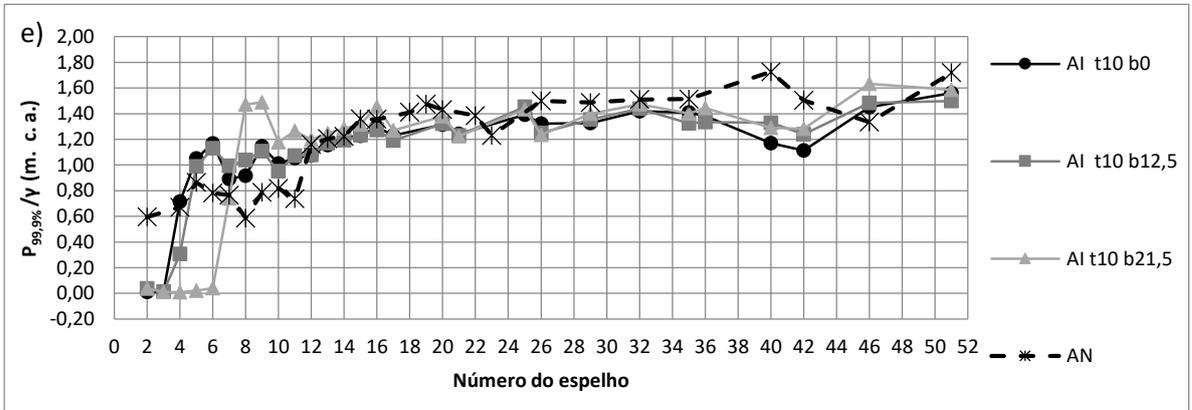
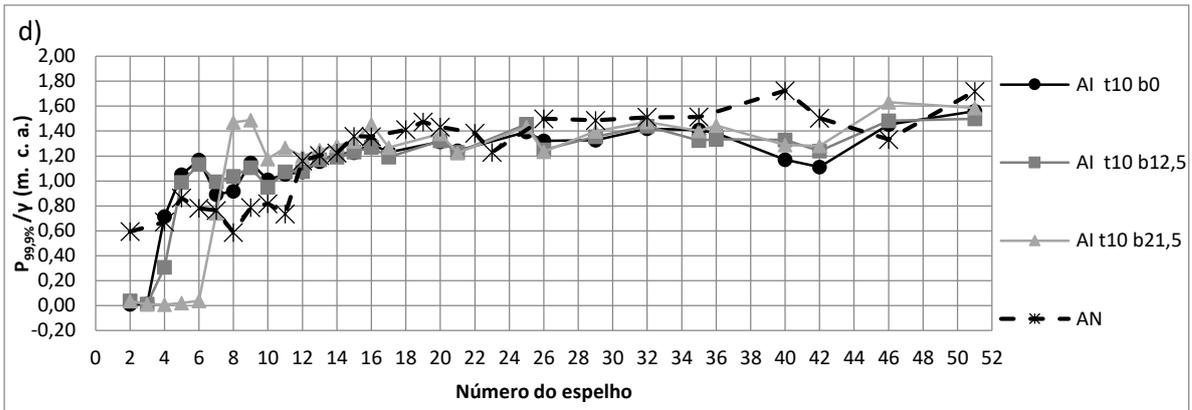
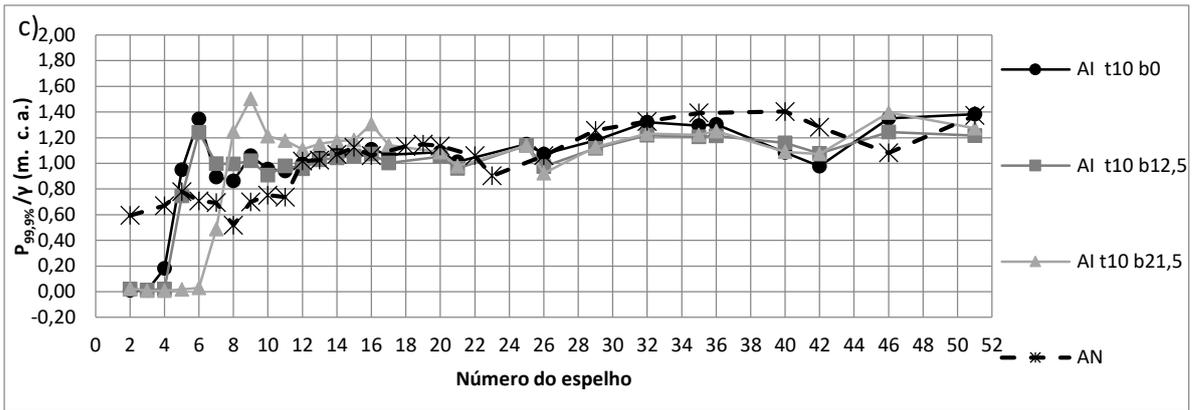
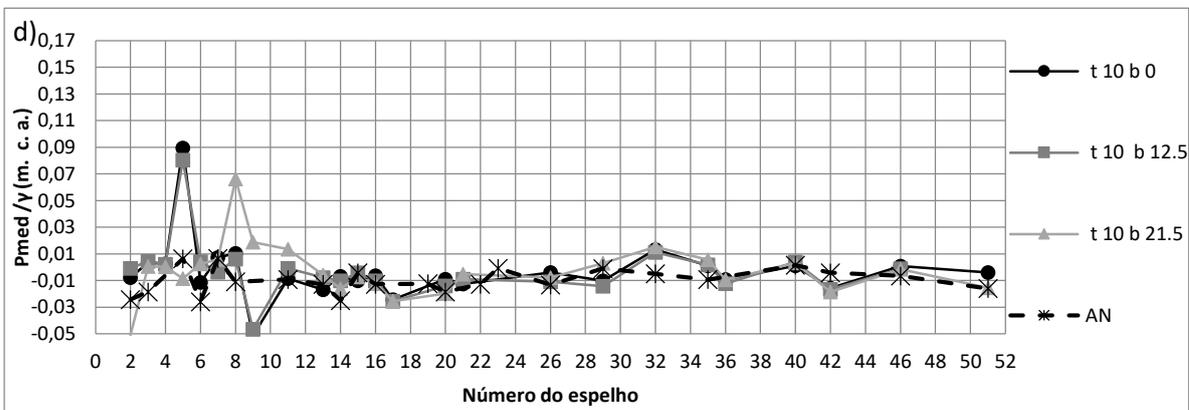
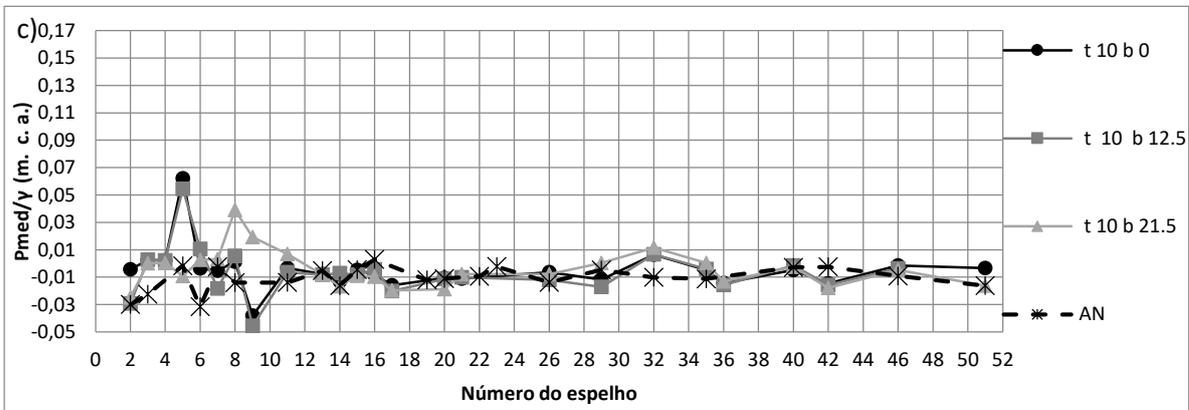
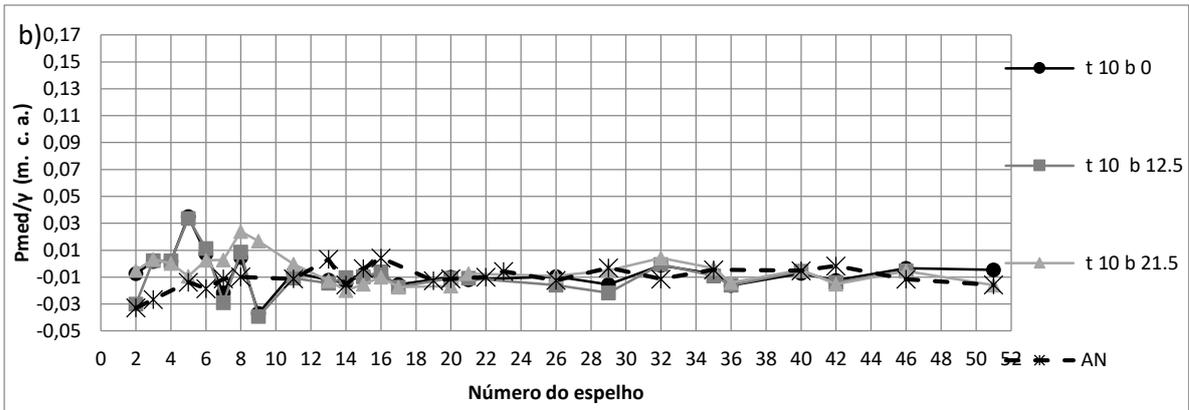
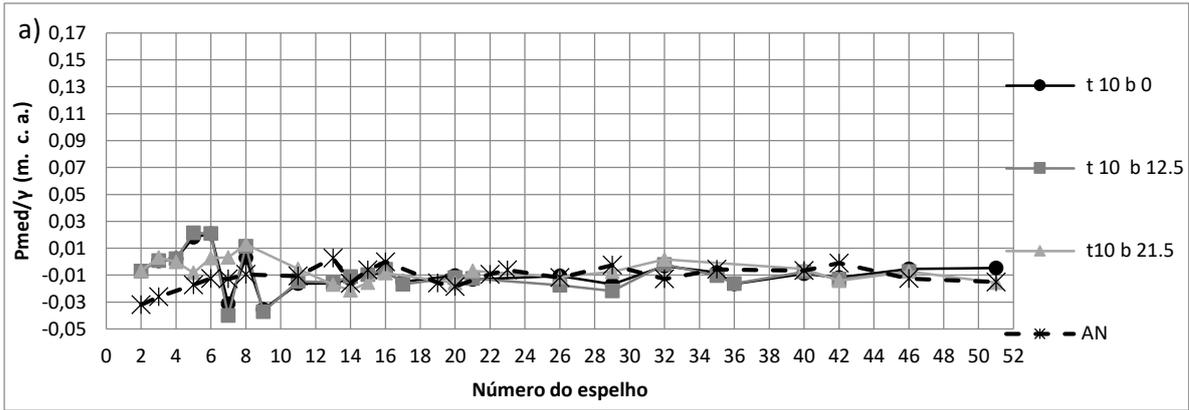


Figura 173 – P99,9% nos patamares dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m³/s/m, (b) 0,108 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,300 m³/s/m, (f) 0,400 m³/s/m e (g) 0,500 m³/s/m.



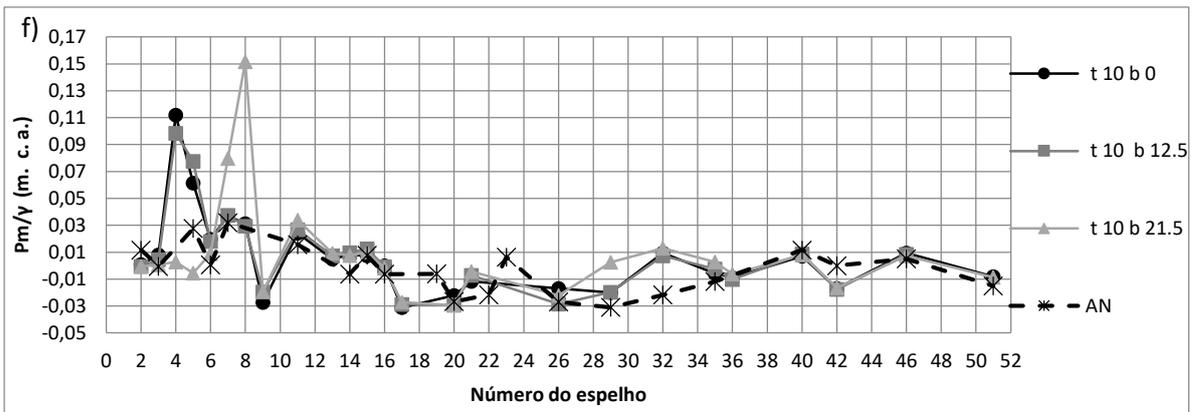
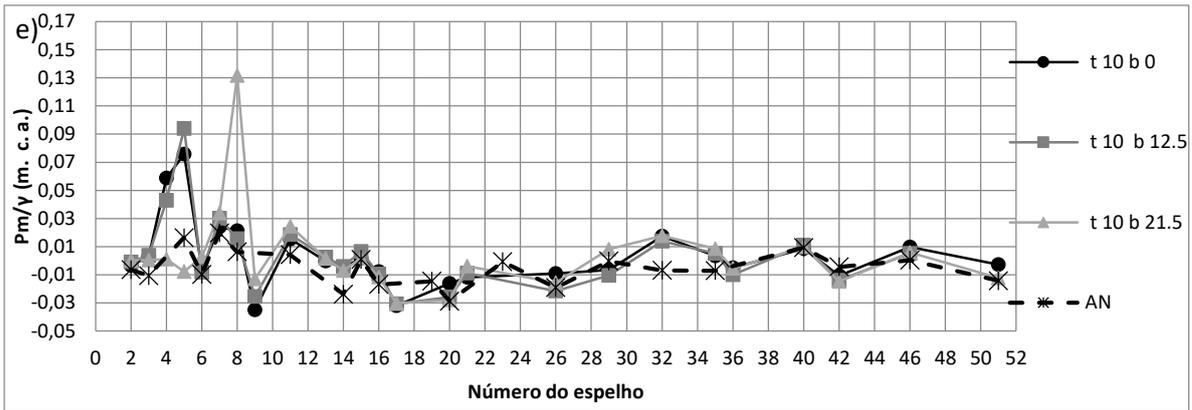
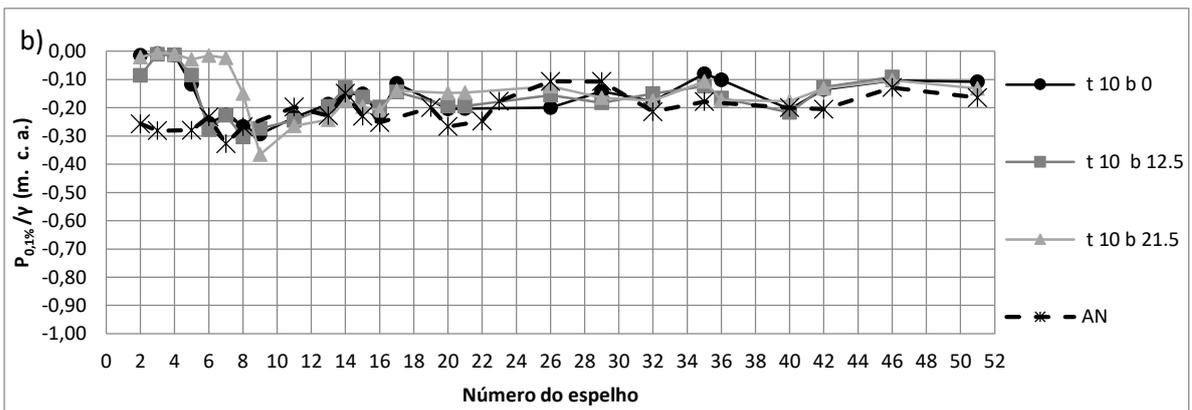
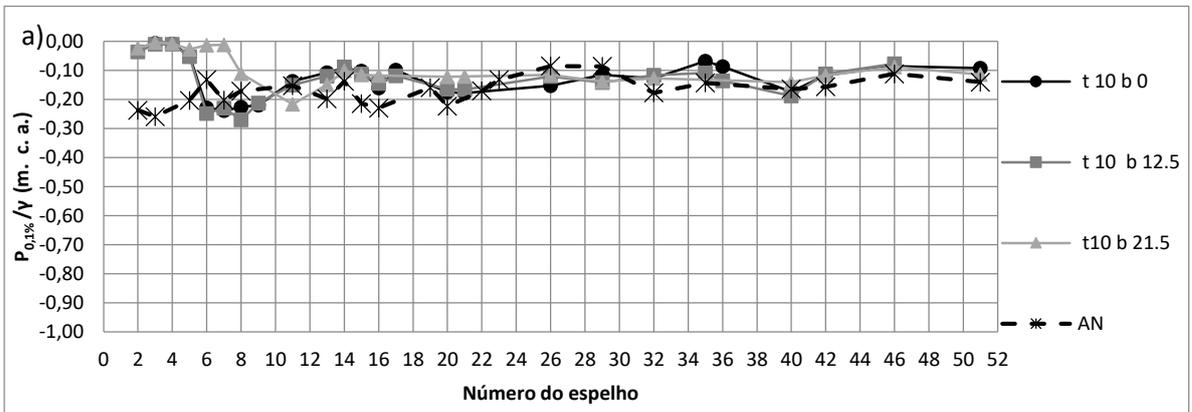


Figura 174 – Pressões médias nos espelhos dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m³/s/m, (b) 0,108 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,300 m³/s/m, (f) 0,400 m³/s/m e (g) 0,500 m³/s/m .



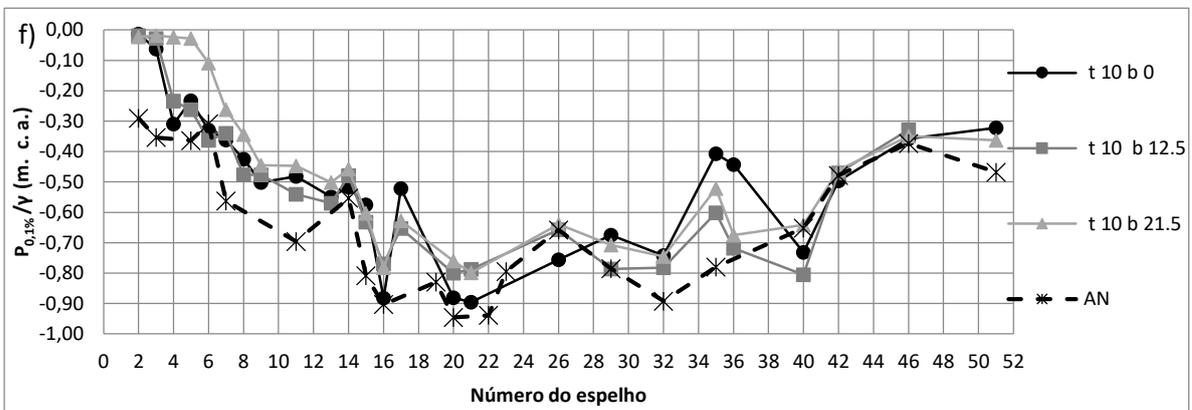
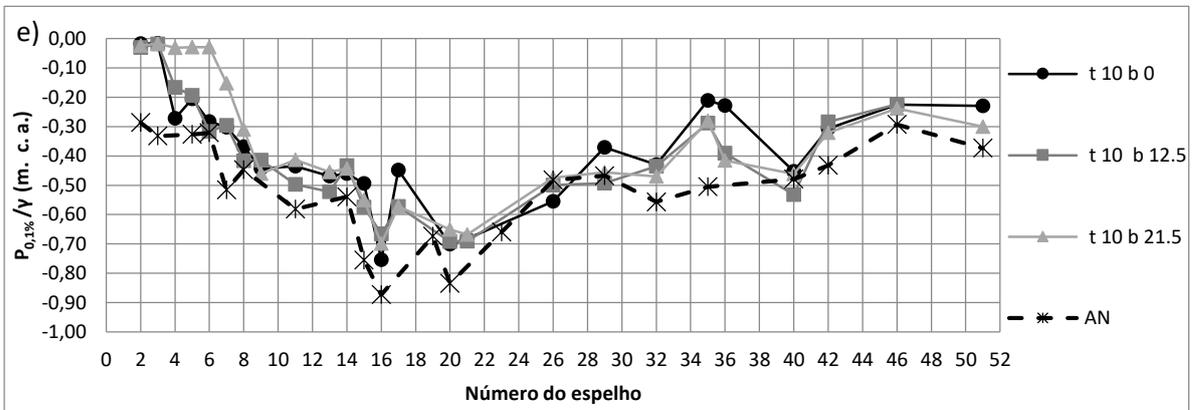
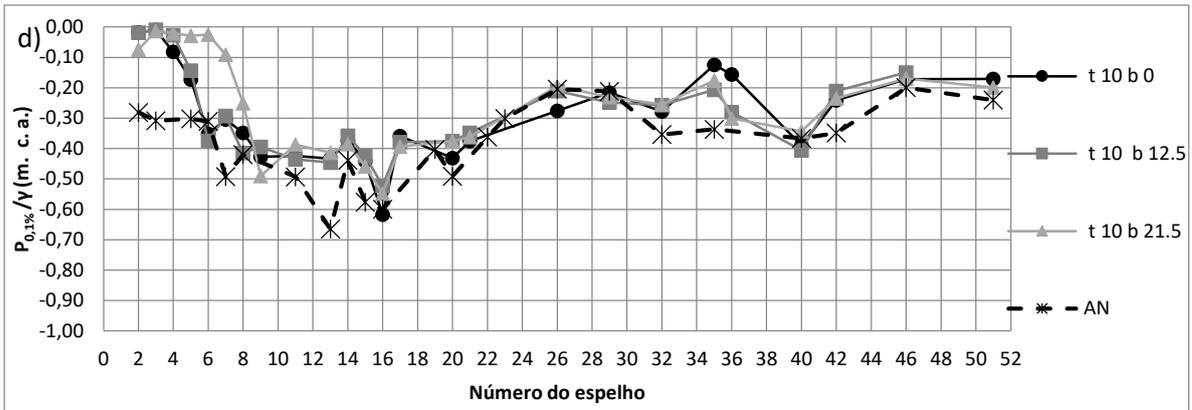
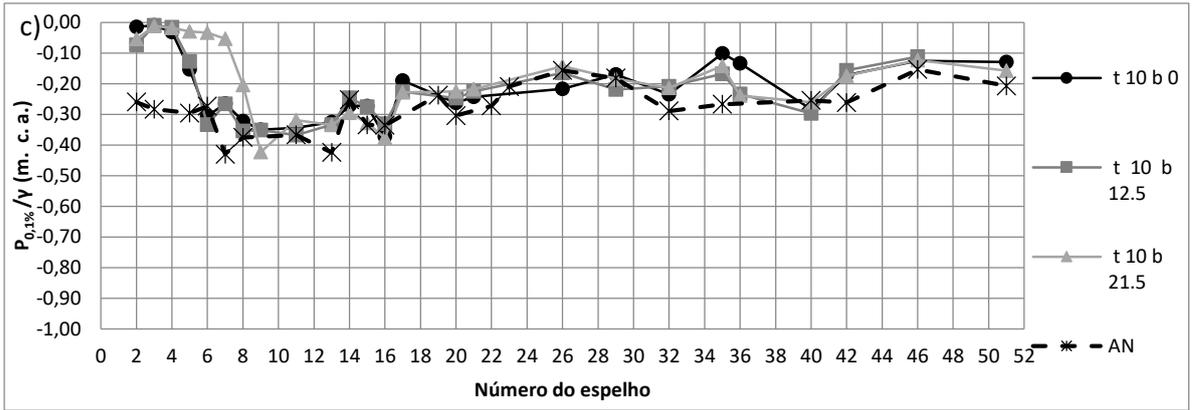
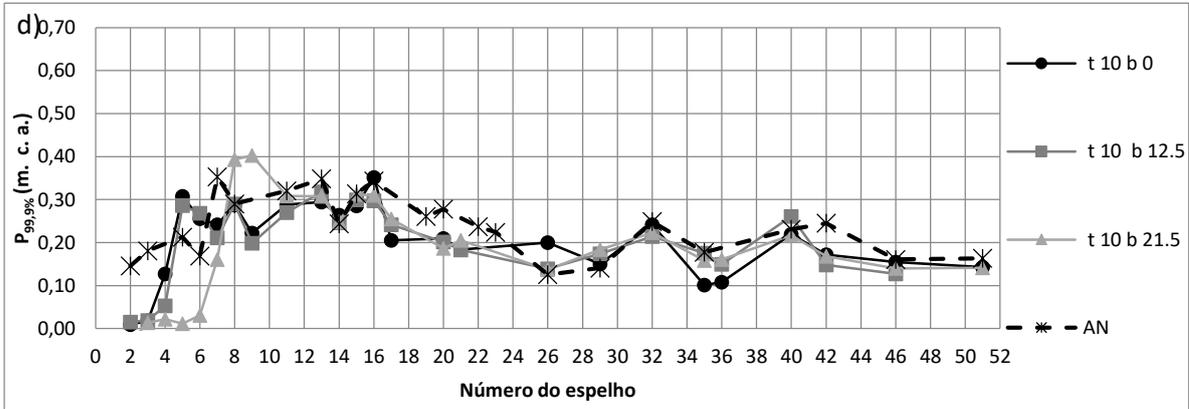
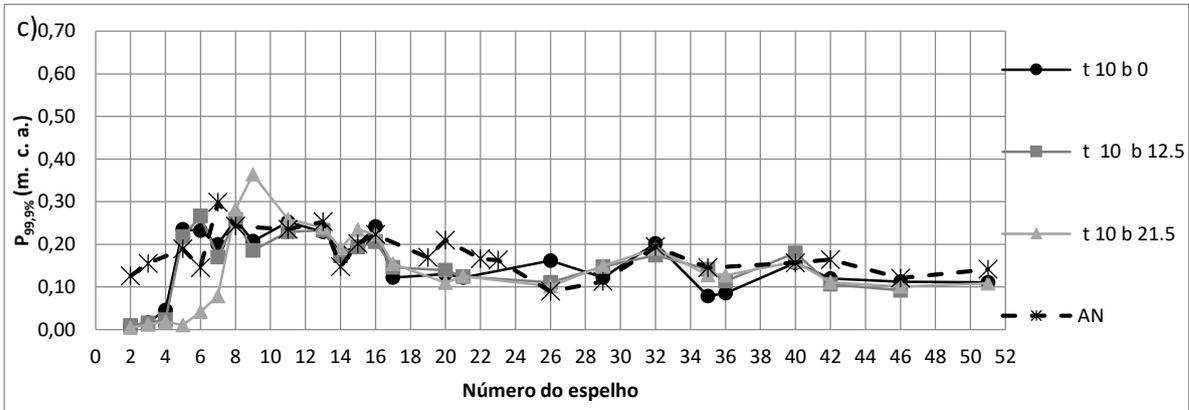
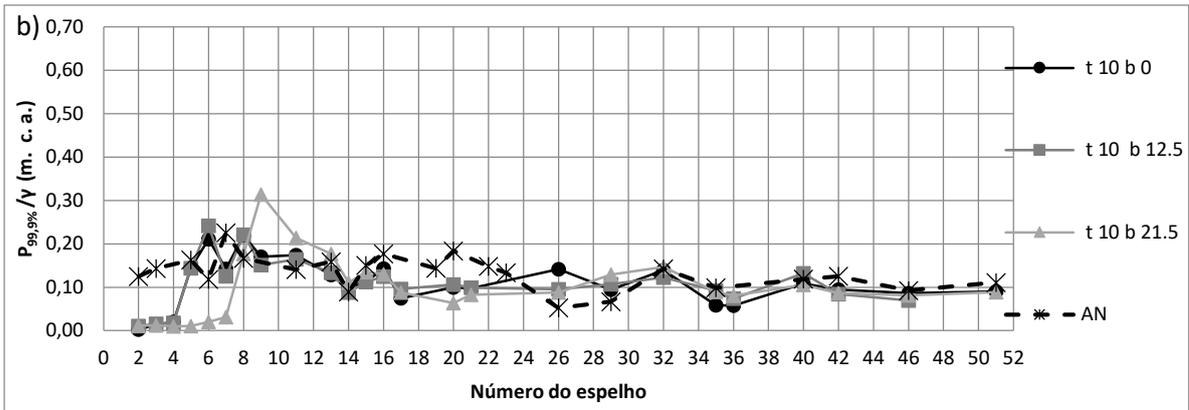
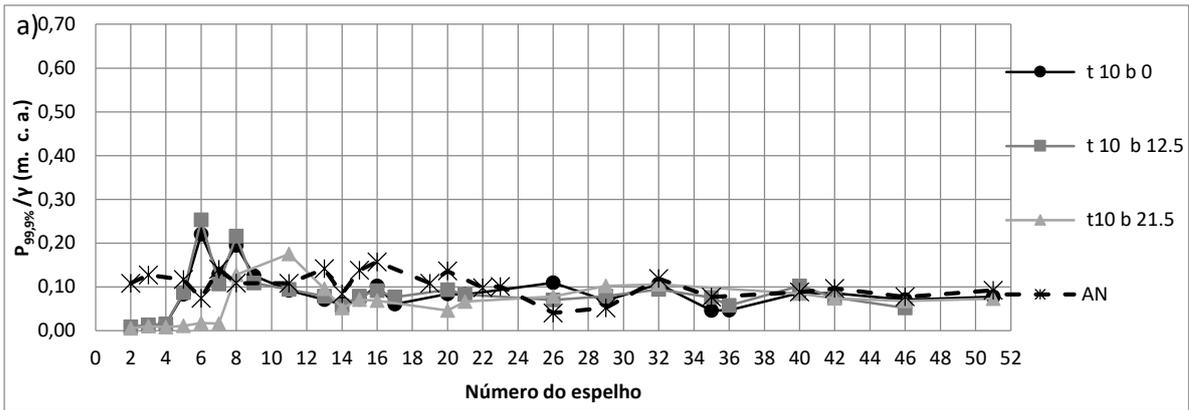


Figura 175 – P01% nos espelhos dos degraus para as vazões de (a) 0,082 m³/s/m, (b) 0,108 m³/s/m, (c) 0,150 m³/s/m, (d) 0,200 m³/s/m, (e) 0,300 m³/s/m, (f) 0,400 m³/s/m e (g)0,500 m³/s/m.



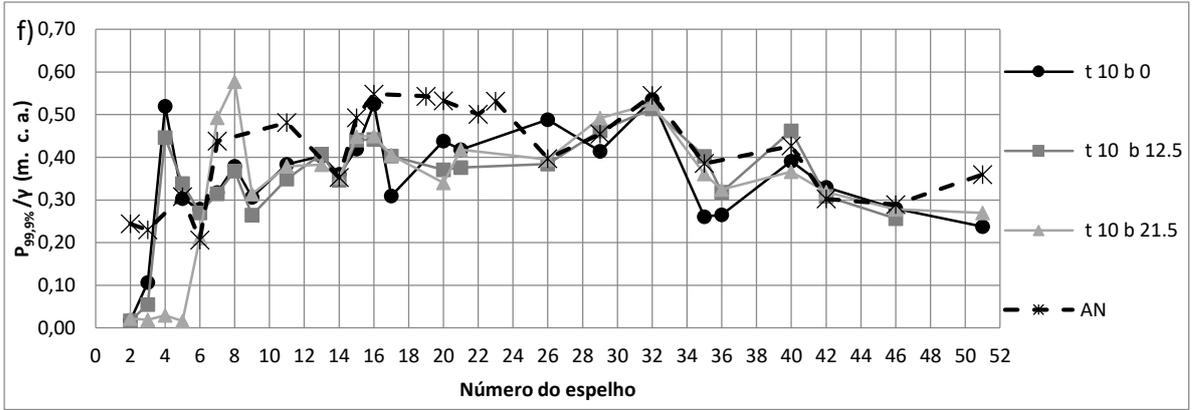
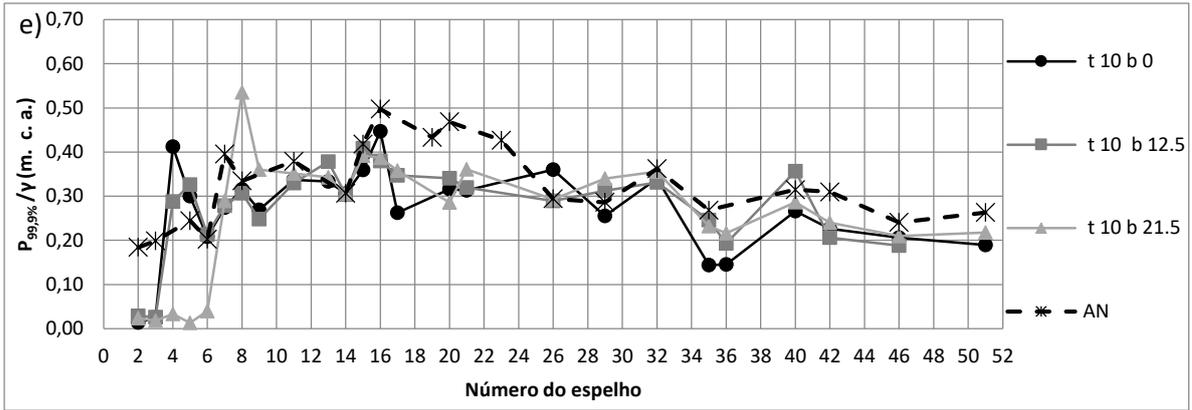
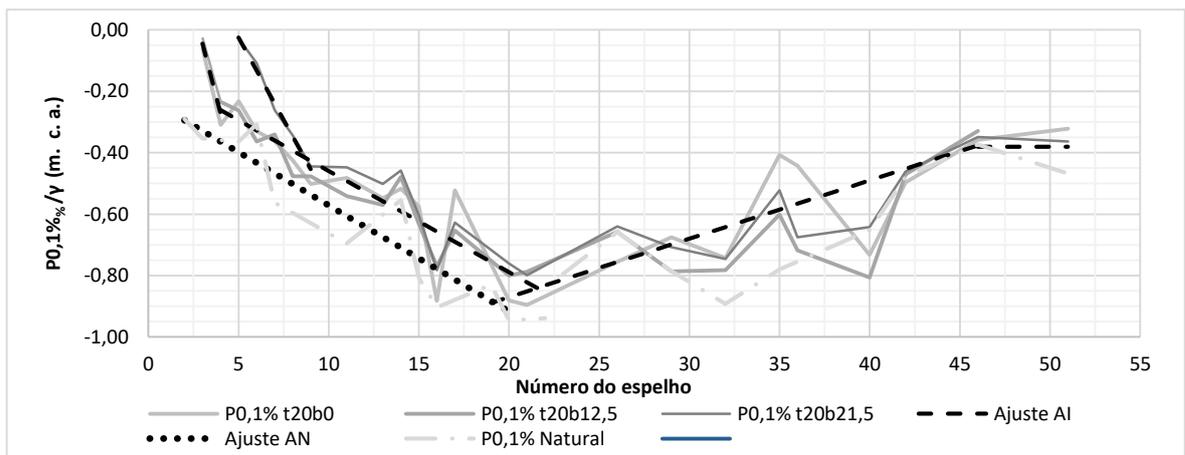
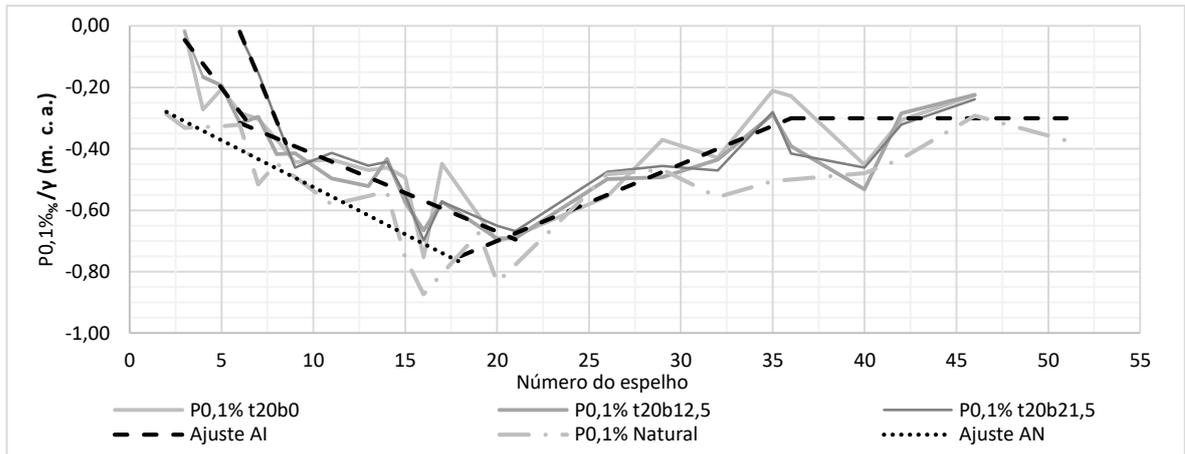
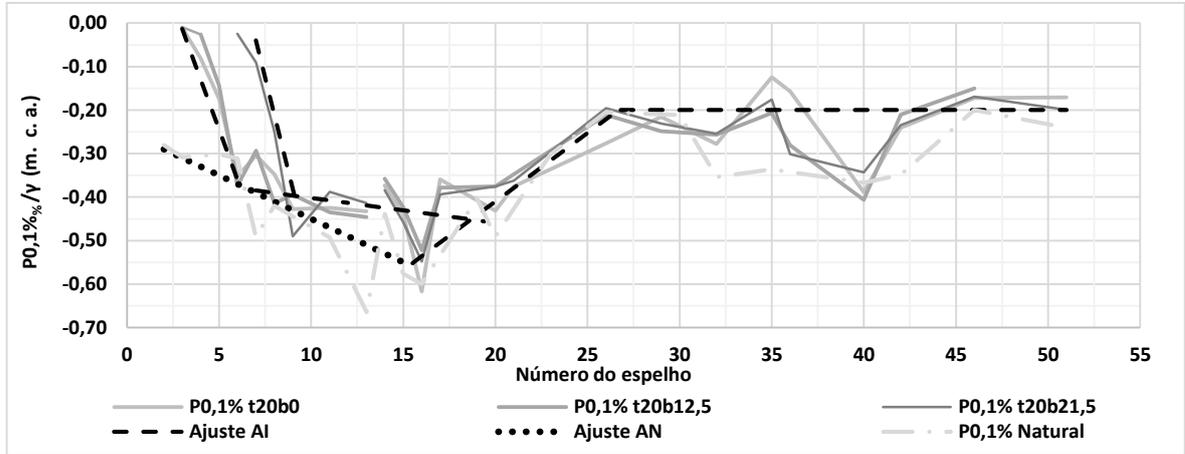


Figura 176 – $P_{99,9\%}$ nos espelhos dos degraus para as vazões de (a) $0,082 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (b) $0,108 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (c) $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (d) $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (e) $0,300 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, (f) $0,400 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e (g) $0,500 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

APENDICE O – COMPORTAMENTO DAS PRESSÕES COM 0,1% DE PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA COM AERAÇÃO INDUZIDA E NATURAL



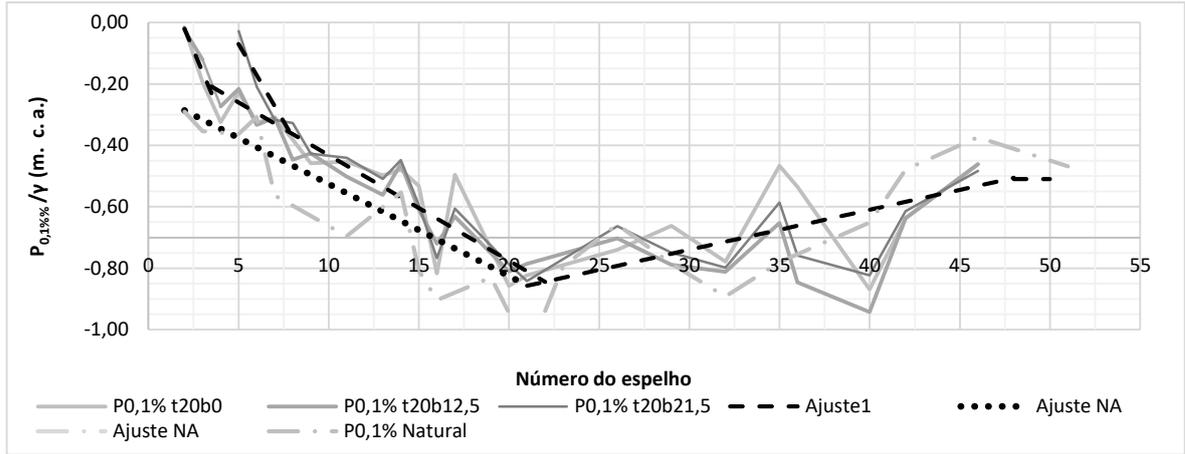


Figura 177 –Comportamento de $P_{0,1\%}$ para as vazões a) $0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, b) $0,3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$, c) $0,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ e d) $0,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

APENDICE P – LIMITE INFERIOR DE APLICAÇÃO DO MÉTODO DE WOOD (1984 apud MATOS, 1999)

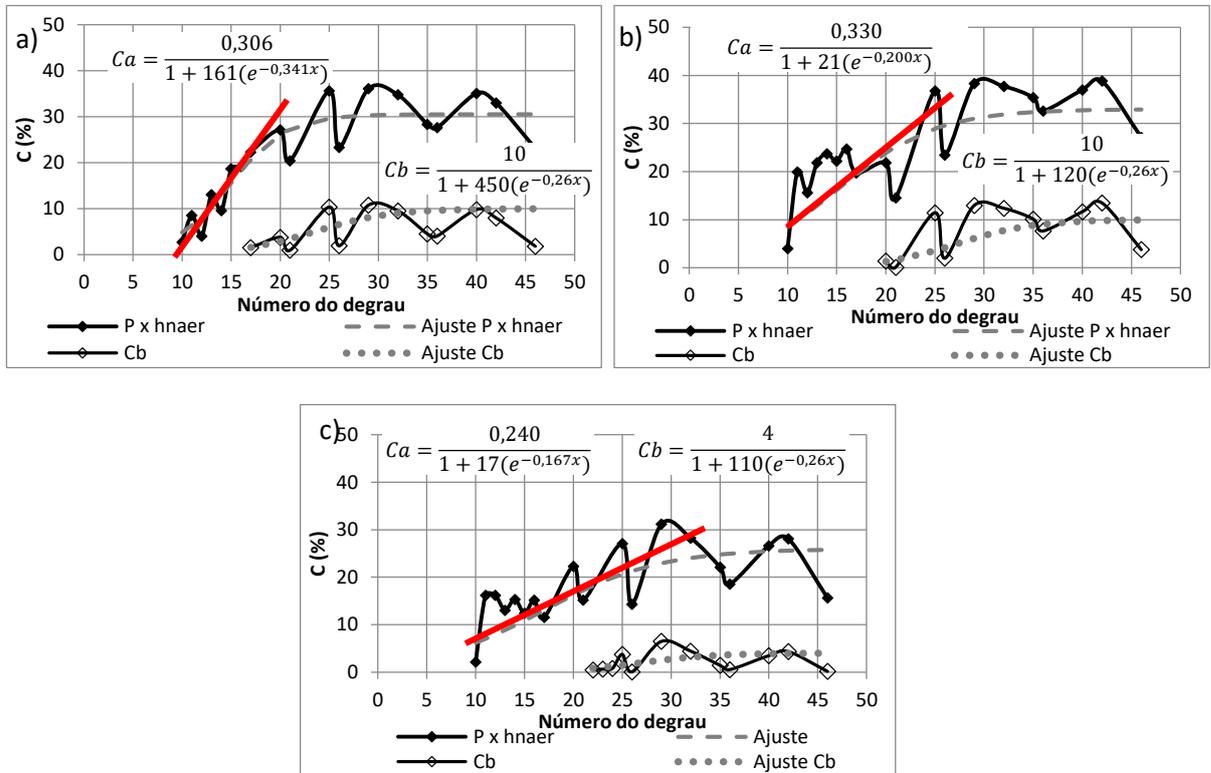


Figura 178 – Limite inferior de aplicação do método de Wood (1984 apud MATOS, 1999) para o defletor t10 b0 para as vazões (a) 0,300 m³/s/m, (b) 0,400 m³/s/m, (c) 0,500 m³/s/m.

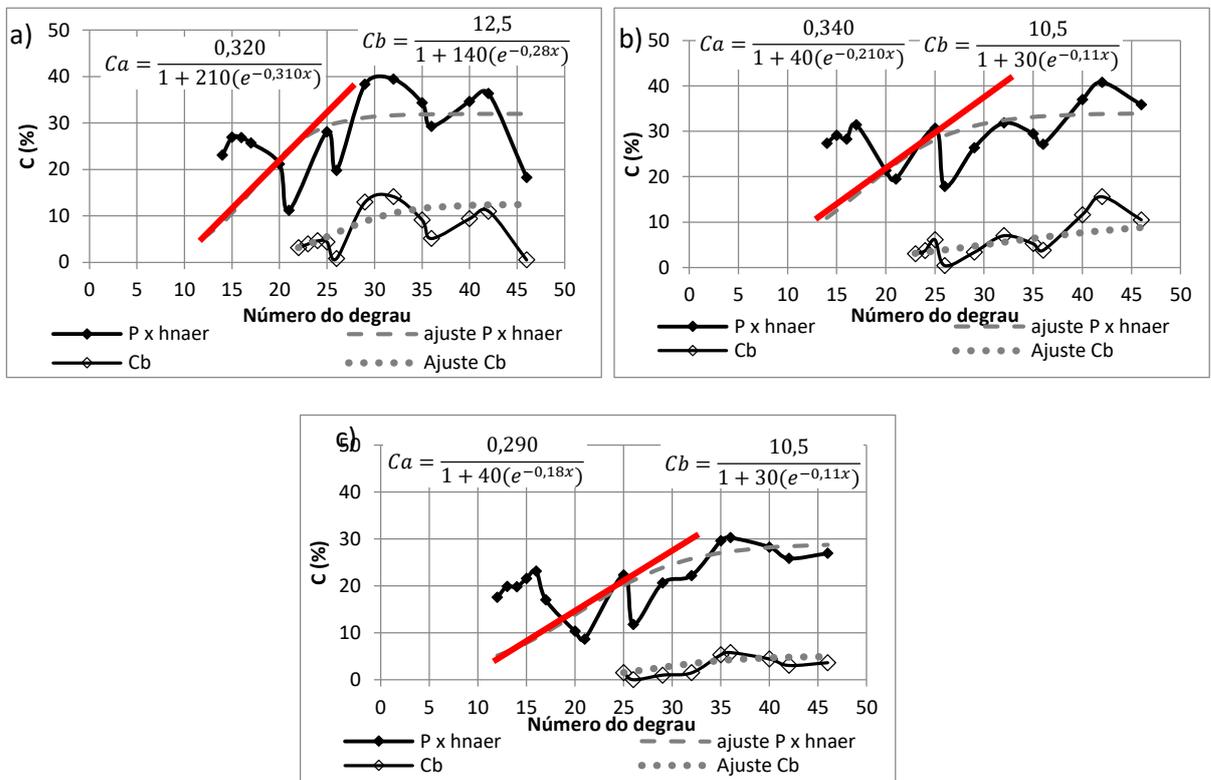


Figura 179 – Limite inferior de aplicação do método de Wood (1984 apud MATOS, 1999) para o defletor t10 b12,5 para as vazões (a) 0,300 m³/s/m, (b) 0,400 m³/s/m, (c) 0,500 m³/s/m.

APENDICE Q – CONCENTRAÇÃO DE AR NO FUNDO NA TOTALIDADE DA CALHA

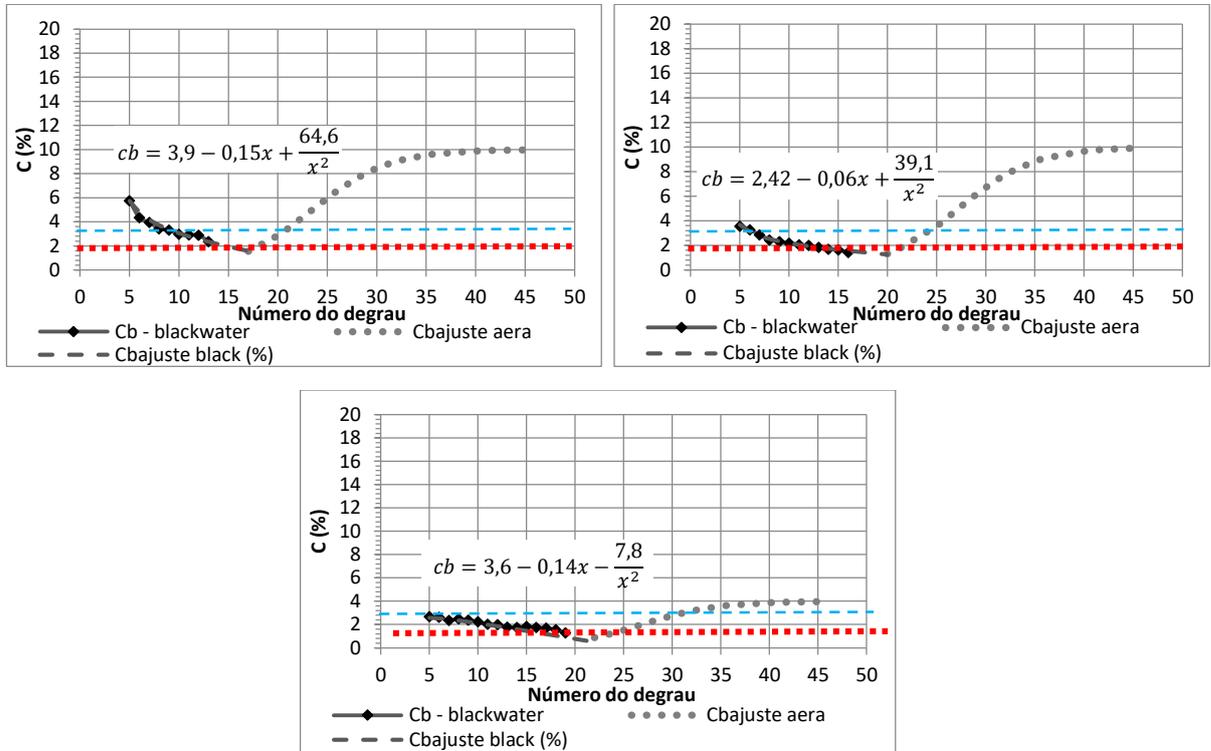


Figura 180 – Concentração de ar no fundo na totalidade da calha para o defletor t10 b0 para as vazões (a) 0,300 m³/s/m, (b) 0,400 m³/s/m e (c) 0,500 m³/s/m.

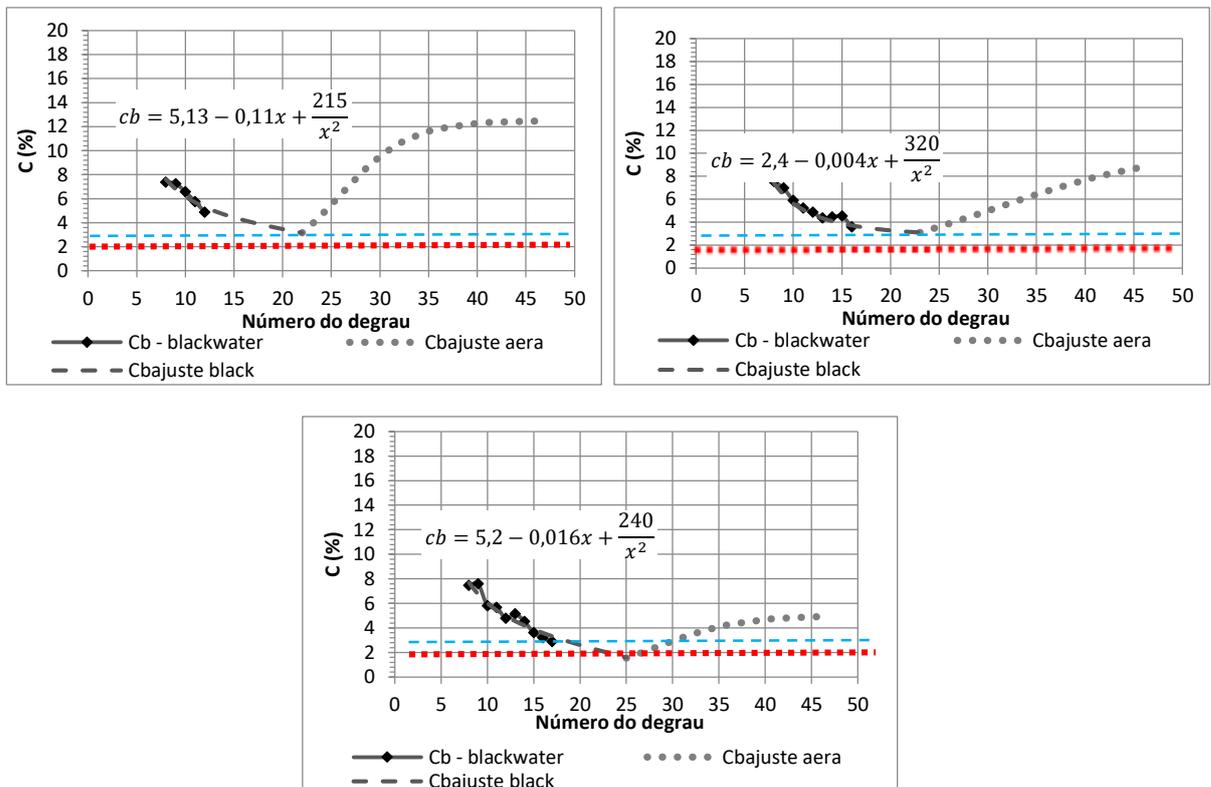


Figura 181 – Concentração de ar no fundo na totalidade da calha para o defletor t10 b21,5 para as vazões (a) 0,300 m³/s/m, (b) 0,400 m³/s/m e (c) 0,500 m³/s/m.

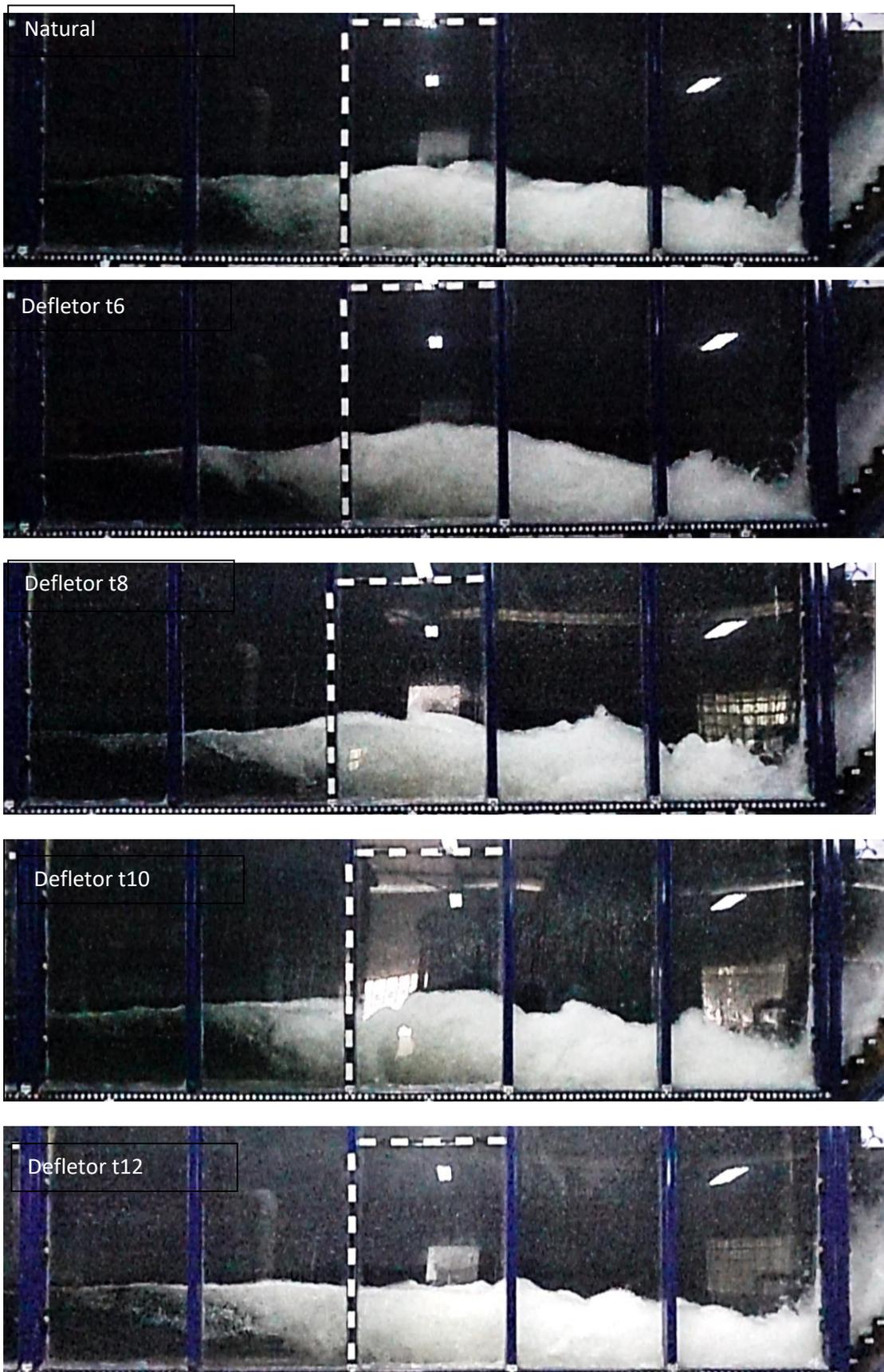
APENDICE R – COMPRIMENTOS DE RESSALTO HIDRÁULICO

Figura 182 – Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 40 l/s.

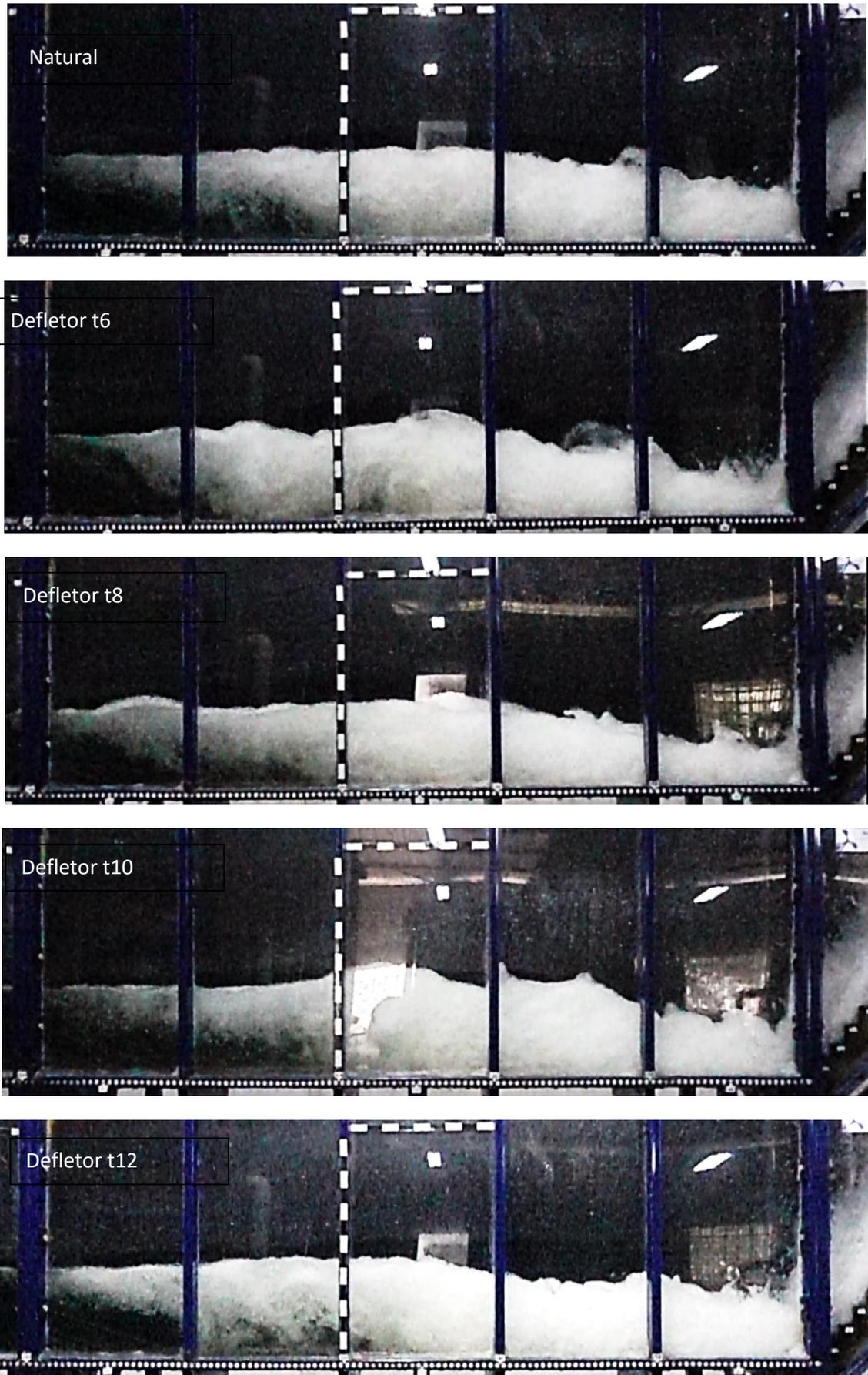


Figura 183 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 50 l/s.

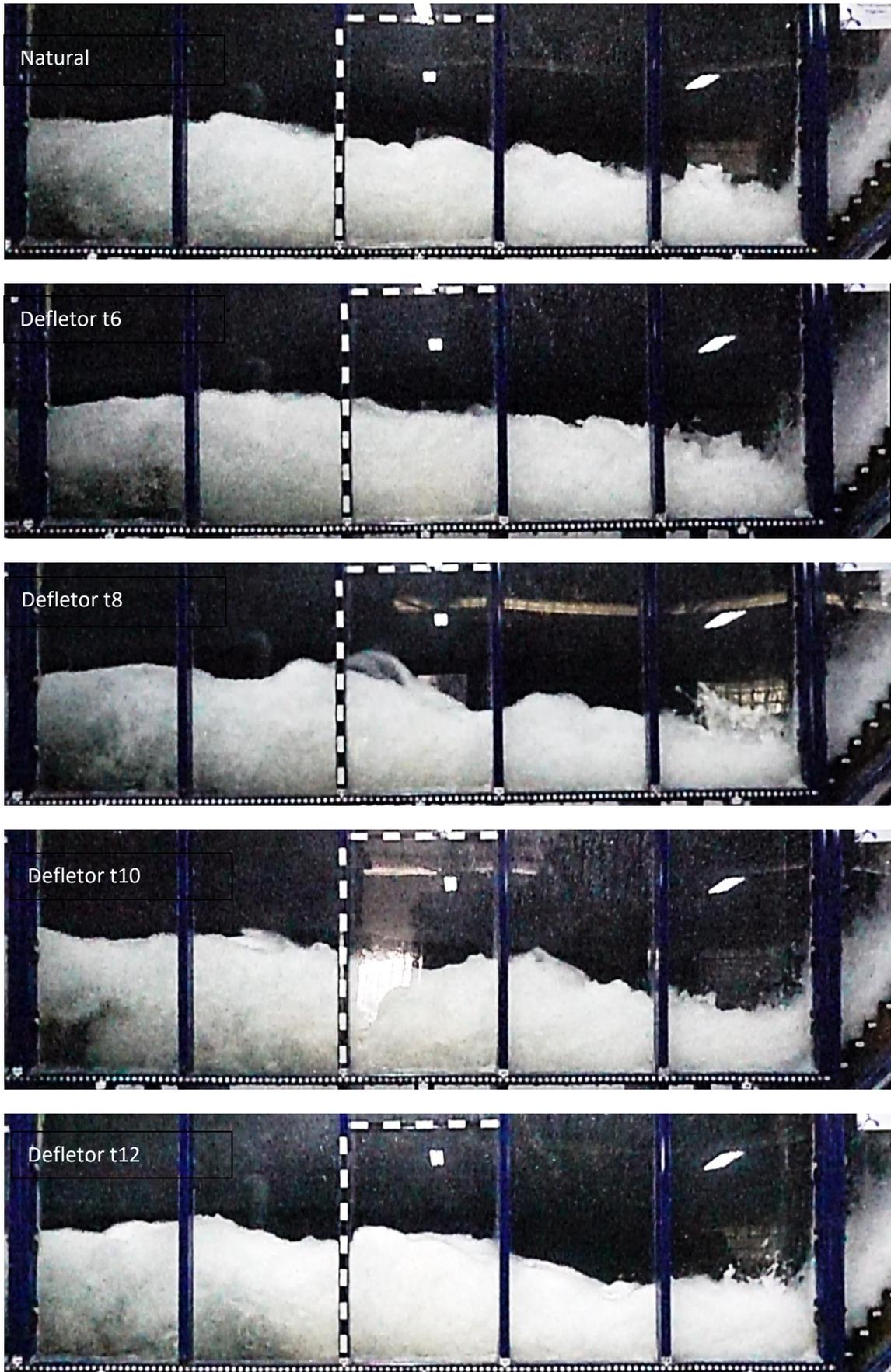


Figura 184 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 80 l/s.

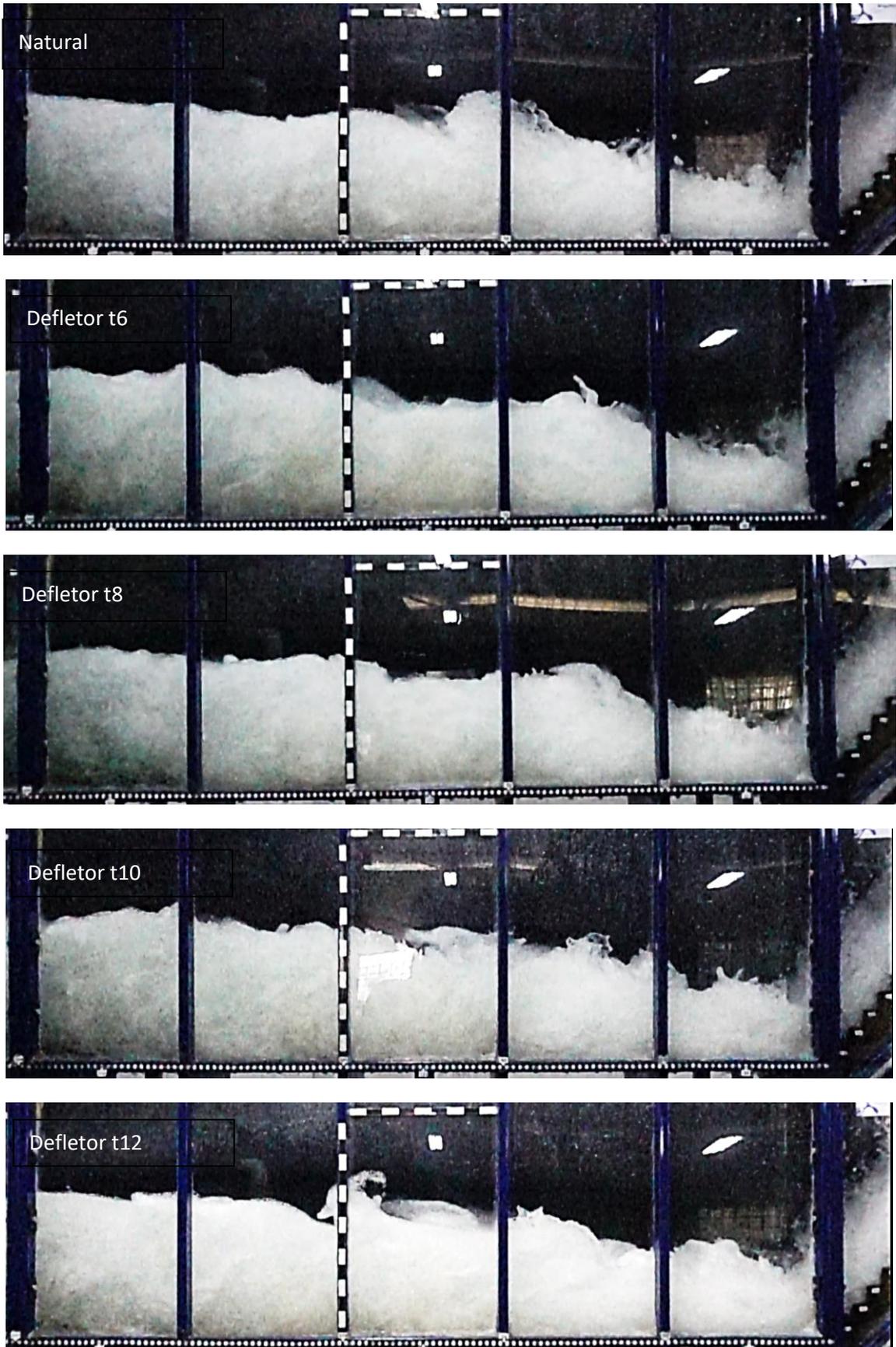


Figura 185 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 100 l/s.

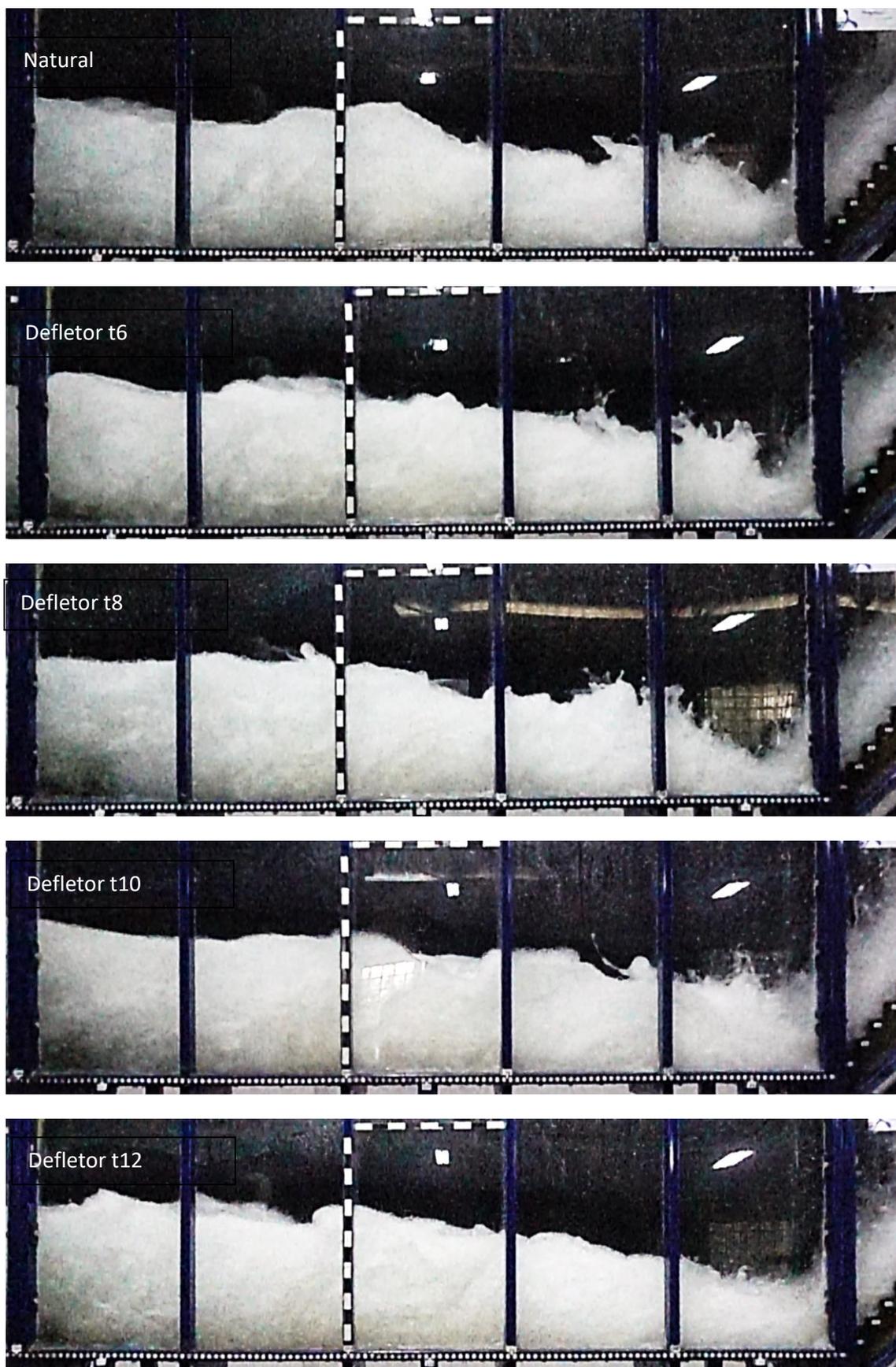


Figura 186 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 110 l/s.

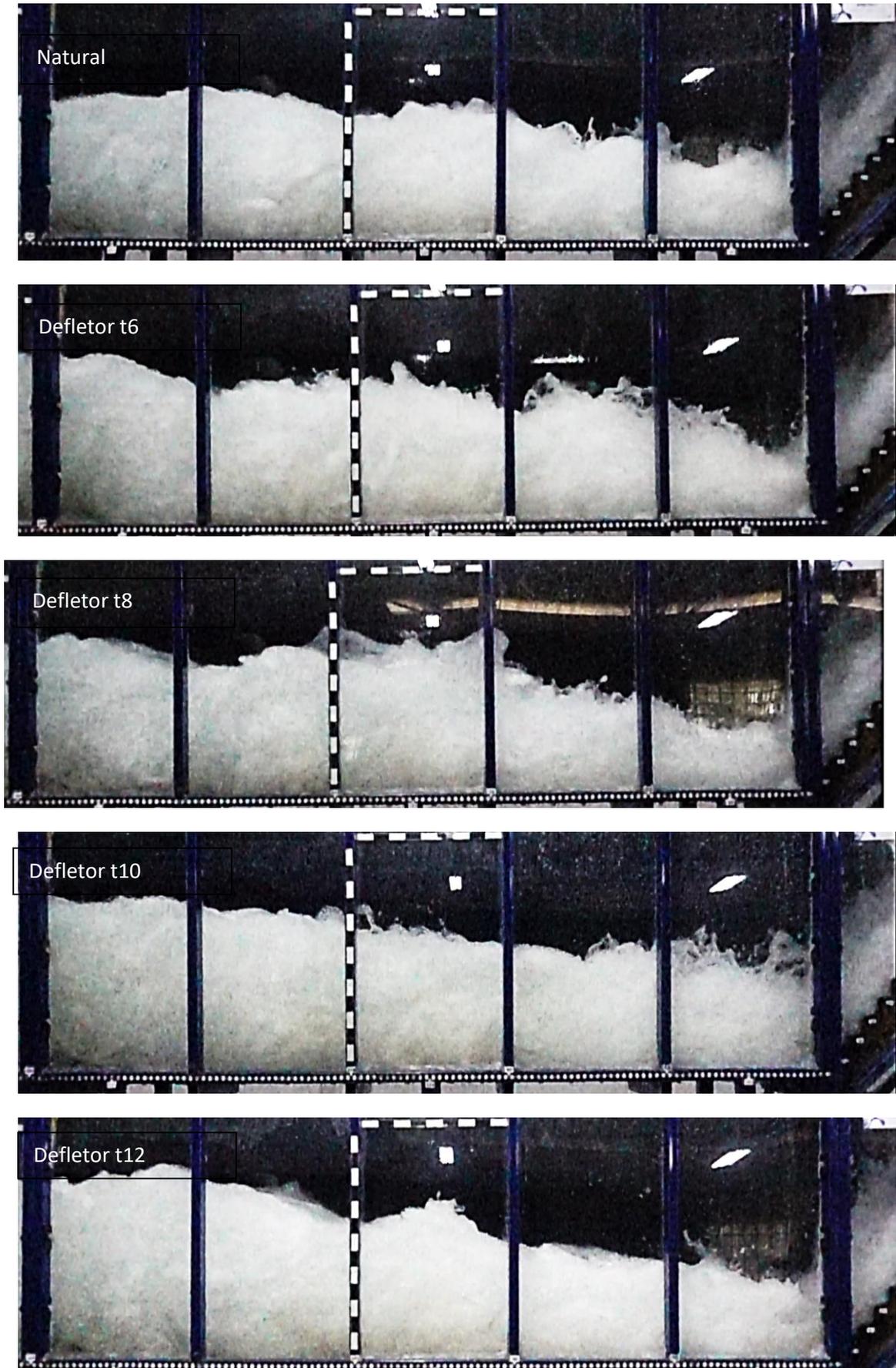


Figura 187 - Comprimentos de ressalto hidráulico visualizados para a vazão de 132 l/s.

APENDICE S – DISSIPAÇÃO DE ENERGIA PARA O MODELO LOH II

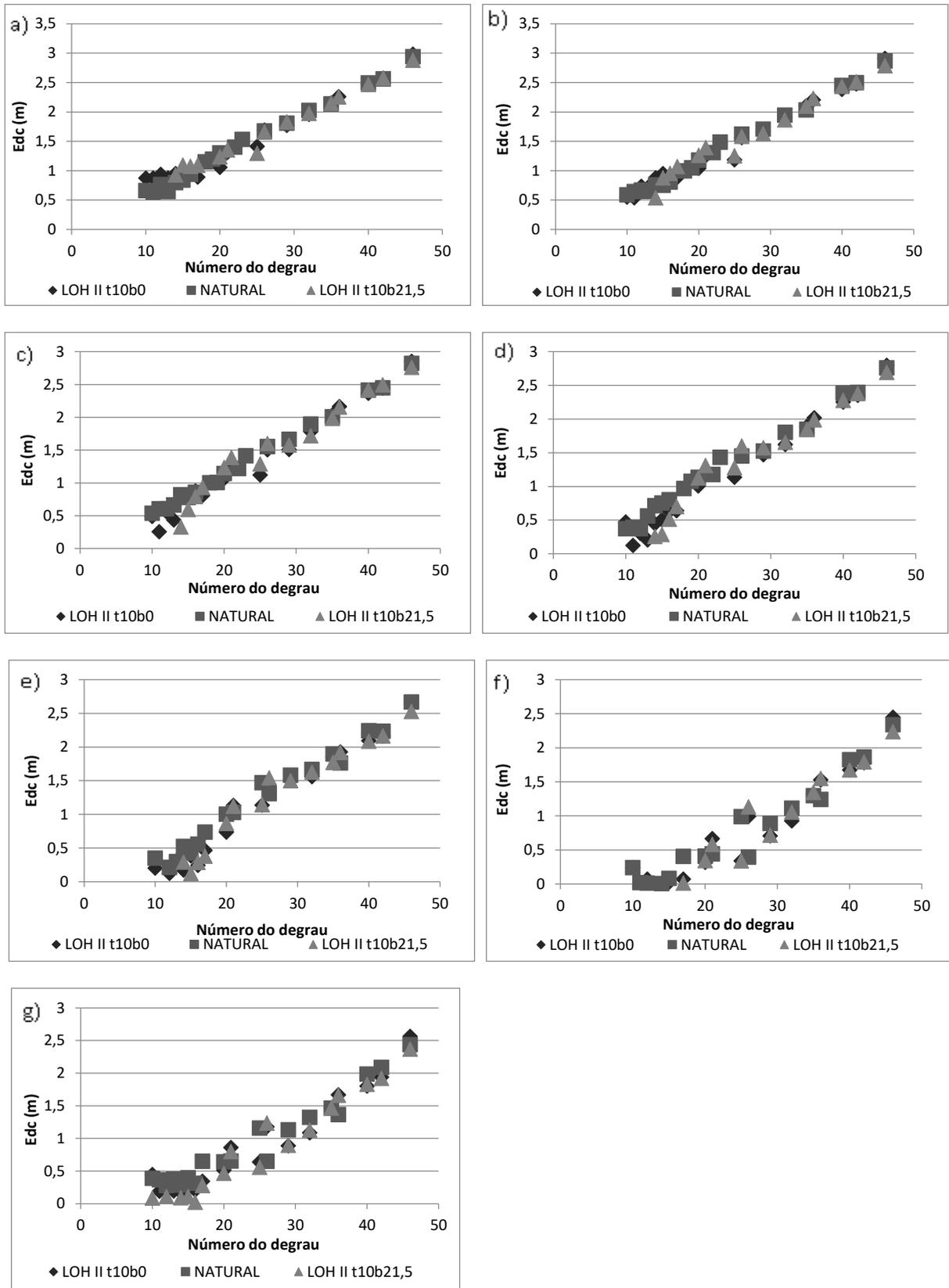


Figura 188 – dissipação de energia para o modelo LOH II para as vazões específicas (a) 0,054 m³/s/m, (b) 0,082 m³/s/m, (c) 0,108 m³/s/m, (d) 0,150 m³/s/m, (e) 0,200 m³/s/m, (f) 0,300 m³/s/m e (g) 0,500 m³/s/m.