

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

PRISCILA DOS SANTOS PRIEBE

INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA POR PILARES NO ESCOAMENTO SOBRE  
VERTEDOUROS EM DEGRAUS

PORTO ALEGRE

2020

PRISCILA DOS SANTOS PRIEBE

INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA POR PILARES NO ESCOAMENTO SOBRE  
VERTEDOUROS EM DEGRAUS

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: Mauricio Dai Prá

PORTO ALEGRE

2020

Priebe, Priscila dos Santos  
Influência da aeração induzida por pilares no  
escoamento sobre vertedouros em degraus / Priscila dos  
Santos Priebe. -- 2020.  
239 f.  
Orientador: Marcelo Giulian Marques.

Coorientador: Mauricio Dai Prá.

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, 2020.

1. Pré-aeração. 2. Pilares. 3. Defletor. 4.  
Pressões. 5. Escoamento aerado. I. Marques, Marcelo  
Giulian, orient. II. Dai Prá, Mauricio, coorient.  
III. Título.

PRISCILA DOS SANTOS PRIEBE

INFLUÊNCIA DA AERAÇÃO INDUZIDA POR PILARES NO ESCOAMENTO SOBRE  
VERTEDOUROS EM DEGRAUS

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.

Aprovado em: Porto Alegre, 20 de março de 2020.

---

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá  
Coorientador

---

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres – UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr. Raúl Antonio Lopardo – UNLP  
Examinador

---

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez – UNIFEI  
Examinador

---

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

Dedico este trabalho aos meus pais, Guido e Leni,  
e ao meu noivo, Renan.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, à Deus por estar comigo em todos os momentos.

Aos meus pais, Guido e Leni, meus grandes motivadores, obrigada por todo amor, dedicação e por sempre apoiarem minhas decisões. Vocês são meus grandes exemplos.

Ao meu amor, Renan, por estar ao meu lado me encorajando e incentivando, com todo seu amor, a seguir o caminho dos meus objetivos. Obrigada pela compreensão nos momentos de ausência. Você é minha motivação!

Aos meus dindos, Cleonice e Raul, e aos meus primos, Kauan e Ruan, que me receberam com muito carinho e amor. Vocês foram essenciais para tornar minha vida em Porto Alegre mais feliz e tranquila. Obrigada por todo o apoio e incentivo.

À minha família e aos meus amigos, em especial a Tati, a Manu e a Tuane, que sempre estiveram ao meu lado me dando força e apoio.

Ao meu orientador Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques e ao meu coorientador Prof. Dr. Mauricio Dai Prá pela orientação, pela confiança e pelas oportunidades de aprendizado. Vocês são grandes exemplos competência profissional.

Aos bolsistas e amigos do Laboratório de Obras Hidráulicas, que foram fundamentais para realização desta pesquisa. Obrigada por tornarem essa caminhada mais prazerosa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental e ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas, por todas as oportunidades de aprendizado oferecidas.

À CAPES, pela concessão da bolsa de doutorado.

À FURNAS Centrais Elétricas.

## RESUMO

Vertedouros em degraus apresentam vantagens quando comparados aos vertedouros com calha lisa, em virtude da macrorrugosidade imposta pelos degraus, que faz com que uma maior quantidade de ar seja incorporada ao escoamento. Apesar das suas vantagens, os vertedouros em degraus estão limitados a vazões específicas da ordem de 15 a 20 m<sup>3</sup>/s/m, devido ao risco de ocorrência de cavitação nos degraus em escoamentos com maiores vazões. Como há demanda por vertedouros com possibilidade de extravasamento de maiores vazões, procurou-se aumentar a concentração de ar do escoamento, através da aeração induzida, para, assim, reduzir o risco de ocorrência de cavitação nos degraus. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar as características do escoamento e os esforços hidrodinâmicos em vertedouros em degraus com aeração induzida por pilares e pilares + defletores, através da análise experimental das pressões médias, flutuações de pressões e pressões extremas máximas e mínimas atuantes nas quinas dos degraus ao longo da calha, comparando com a aeração natural do escoamento. Os estudos experimentais deste trabalho foram desenvolvidos em dois modelos físicos de vertedouros em degraus com escala de 1:10 e declividade de 1V:0,75H. O modelo do vertedouro em degraus instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH I) possui degraus com altura de 0,06 m e a largura da calha de 0,40 m e o outro modelo, instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas (LAHE), possui degraus com altura de 0,09 m e calha com largura de 1,15 m. Para caracterizar a aeração induzida foram instalados pilares nas laterais a partir do início da ogiva até o primeiro degrau e defletores no primeiro degrau da calha. No modelo do LOH I foi instalado um único defletor com espessura de 6 mm e no modelo do LAHE foram instalados defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm. A partir da análise visual do comportamento do escoamento verificou-se que, independente do modelo físico, a aeração induzida por pilares e defletores permitiu a incorporação de ar na parte inferior do escoamento a montante da região em que ocorre a aeração superficial. No entanto, para o modelo do LOH I, em virtude da distância entre pilares ser pequena, a concentração de ar é maior, quando comparado ao modelo do LAHE, que possui uma distância entre pilares representativa da distância em protótipos. E, isso influenciou as cargas de flutuações de pressões e de pressões extremas mínimas e máximas, as quais foram atenuadas nessa região, quando comparada à aeração natural, para o modelo do LOH I. No modelo do LAHE, através da análise visual do escoamento, constatou-se que a aeração induzida por pilares apresentou concentração de ar inferior mais uniforme a partir do início da calha em degraus, quando comparada às configurações de aeração induzida com pilares + defletores, as quais são caracterizadas pela formação de um jato, que é lançado sobre os degraus, aeração inferior e aeração superficial do escoamento. As cargas de pressões apresentaram-se mais extremas, quando comparada à aeração natural, até a região de início de aeração superficial do escoamento, no entanto, a concentração de ar na parte inferior do escoamento, que está em contato com a estrutura, aumentou, e isso, pode proteger o concreto de possíveis danos por cavitação, porém, é necessário realizar análises de concentração de ar no escoamento.

**Palavras-chave:** Pré-aeração. Pilares. Defletor. Pressões. Escoamento aerado.

## ABSTRACT

Stepped spillways present advantages when compared to smooth chute spillways, due to macro roughness in the steps, which allows higher air incorporation in the flow. Despite their advantages, stepped spillways are limited to specific flow rates in the order of 15 to 20 m<sup>3</sup>/s/m, due to the risk of occurrence of cavitation in the steps with higher flow rates. Since there is a demand for spillways with the possibility of overflow of higher flow rates, an attempt was made to raise the air concentration in the flow through induced aeration, in order to reduce the risk of occurrence of cavitation in the steps. Thus, the objective of this study is to evaluate flow characteristics and the hydrodynamic efforts in stepped spillways with aeration induced by pillars + deflector, through experimental analysis of average pressures, pressure fluctuations and maximum and minimum pressures on the corners of the steps along the chute, comparing with natural flow aeration. The experimental studies of this work were developed in two physical models of stepped spillways of scale 1:10 and slope 1V:0,75H. The stepped spillway model installed in the Laboratório de Obras Hidráulicas of the Universidade Federal do Rio Grande do Sul (LOH I), has steps of 0.06 m in height and 0.40 m in chute width and the other model, installed in the Laboratório de Hidráulica Experimental of FURNAS Centrais Elétricas (LAHE), has steps of 0.09 m in height and 1.15 m in chute width. To characterize induced aeration pillars were installed on the sides from the beginning of the ogee till the the first step and deflector on the first step of the chute. In the LOH I model, a single baffle with 6 mm thickness was installed, and in the LAHE model, deflector with 0.3 and 0.9 mm thickness were installed. From the visual analysis of flow behavior, it was verified that, regardless of the model, aeration induced by pillars and deflector allowed for air incorporation on the lower part of the flow upstream of the region where superficial aeration occurs. However, in the LOH I model, due to the small distance between the pillars, the air concentration is higher when compared to the LAHE model, which has a distance between pillars that is representative of prototypes. This influenced the pressure fluctuation loads as well as the maximum and minimum extreme pressure loads, which were attenuated in this region when compared to natural aeration in the LOH I model. In the LAHE model, through visual analysis of flow, it was found that aeration induced by pillars presented lower and more uniform air concentration from the beginning of the stepped chute, when compared to configurations of aeration induced by pillars + deflector, which are characterized by formation of a jet, which is released on the steps, lower aeration and superficial flow aeration. The pressure loads were more extreme, when compared to natural aeration, till the region where natural aeration begins, however, air concentration in the lower part of flow, which is in contact with the structure, increased, and this can protect the concrete from possible cavitation damage, but it is necessary to perform air concentration analysis in the flow.

**Keywords:** Pre-aeration. Pillars. Deflector. Pressures. Aerated flows.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Barragem de Dachaoshan na China vertedouro em operação. Fonte: Terrier (2016).....	24
Figura 2 – (a) Barragem de Arkanania, Grécia. Fonte: Chanson (2015) (b) Barragem de New Croton, Estados Unidos. Fonte: Miguel (2016).....	27
Figura 3 - Regimes de escoamento sobre vertedouro em degraus (a) escoamento deslizante sobre turbilhões ( <i>Skimming Flow</i> ); (b) Escoamento de transição; (c) escoamento em quedas sucessivas ( <i>Nappe Flow</i> ). Fonte: Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2001). ....	29
Figura 4 - Desenvolvimento da aeração em uma calha em degraus. Fonte: adaptado de Chanson (1994a).....	31
Figura 5 - Dimensões da calha em degrau. Fonte: Dai Prá (2004).....	32
Figura 6 - Evolução da pressão ao longo da calha do vertedouro em degraus para os patamares e $h_c/h_d = 2,246$ . Fonte: adaptado de Sanchez (2001) .....	34
Figura 7 - Distribuição de pressões médias nas faces do espelho e patamar de um degrau de um vertedouro (a) degrau de 3 cm (b) degrau de 6 cm (c) degrau de 9 cm para $Y/H_p = 3,81$ . Fonte: adaptado de Sanagiotto (2003).....	35
Figura 8 - Distribuição de pressões médias nas faces do espelho e patamar de um degrau de um vertedouro (a) degrau de 3 cm (b) degrau de 6 cm (c) degrau de 9 cm. Fonte: adaptado de Dai Prá (2004).....	37
Figura 9 – Coeficiente de pressão média ( $C_{pm}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o espelho a uma distância $0,06h_d$ da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006).....	39
Figura 10 – Coeficiente de pressão extremo ( $C_{pa}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o espelho a uma distância $0,06h_d$ da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006).....	39
Figura 11 - Coeficiente de pressão média ( $C_{pm}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o patamar a uma distância $0,06h_d$ da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006). ....	40
Figura 12 - Coeficiente de pressão extremo ( $C_{pa}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o patamar a uma distância $0,06h_d$ da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006). ....	40
Figura 13 - Aeradores testados por Bradley (1945) (dimensões em polegadas). Fonte: adaptado de Terrier (2016) .....	45
Figura 14 - Processo de entrada de ar através de um aerador do tipo defletor. Fonte: adaptado de Volkart e Rutschmann (1984).....	46
Figura 15 - Principais dispositivos de aeração e suas combinações. Fonte: adaptado de Volkart e Rutschmann (1994) .....	47
Figura 16 - Representação de sistemas de fornecimento de ar (a) fornecimento de ar com defletor lateral, (b) fornecimento de ar com degrau lateral, (c) fornecimento de ar por pilar, (d) fornecimento de ar por ranhuras laterais, (e) fornecimento de ar por condutos especiais abaixo do escoamento e (f) sistema de aeração especial. Fonte: adaptado de Falvey (1990) .....	49
Figura 17 - Esboço do dispositivo de aeração utilizado nos experimentos de Kokpinar e Gogus (2002). Fonte: adaptado de Kokpinar e Gogus (2002).....	50
Figura 18 – Modelo físico utilizado no estudo de Bahena et al. (2018). Fonte: adaptado de Bahena et al. (2018). ....	51
Figura 19 - Posição dos dois tipos de defletores utilizados no estudo (A) defletor, (B) primeiro degrau, (C) fornecimento de ar e (PB) Pseudo-fundo. Fonte: adaptado de Pfister, Hager e Minor (2006a).....	52
Figura 20 - Concentração de ar ( $C_b$ ) junto à parte inferior da calha, indicando as quatro regiões. Fonte: Pfister, Hager e Minor. (2006a). ....	52
Figura 21 – Detalhe da geometria do aerador estudado por Pfister, Hager e Minor (2006b) (PB) pseudofundo. Fonte: adaptado de Pfister, Hager e Minor (2006b).....	54

Figura 22 – (a) Escoamento sem aerador de fundo e (b) Escoamento com aerador de fundo para três diferentes vazões ensaiadas por Pfister, Hager e Minor (2006b). Fonte: modificado de Pfister, Hager e Minor (2006b).	55
Figura 23 – Detalhe da geometria do aerador estudado por Zamora et al. (2008). Fonte: modificado de Zamora et al. (2008).	55
Figura 24 - Detalhe dos tipos de defletores estudados por Mojtaba et al.(2015). Fonte: modificado de Mojtaba et al. (2015).	57
Figura 25 - Aerador tipo pilar estudado por Wang, Hou e Wang (2012). Fonte: adaptado de Wang, Hou e Wang (2012)	58
Figura 26 - Cavidades formadas atrás dos aeradores pilares. Fonte: adaptado de Wang, Hou e Wang 2012	58
Figura 27 – (a) Modelo físico do vertedouro em degraus com aeração induzida (b) esquema do modelo físico estudado por Terrier (2016). Fonte: adaptado de Terrier (2016).	59
Figura 28 – Pilares instalados no modelo físico de vertedouro em degraus do estudo de Calitz (2015) (a) Pilar Tipo 1 e (b) Pilar Tipo 2. Fonte: adaptado de Calitz (2015)	60
Figura 29 – Menores pressões mínimas ao longo do vertedouro em degraus para as configurações sem pilar, Pilar Tipo 1 e Pilar Tipo 2 para as vazões específicas (a) 25 m <sup>3</sup> /s/m e (b) 30 m <sup>3</sup> /s/m. Fonte: adaptado de Calitz (2015).	61
Figura 30 – Análise da cavitação no modelo físico do vertedouro em degraus com pilar Tipo 1 (a) através do método A para q=25 m <sup>3</sup> /s/m; (b) através do método A para q=30 m <sup>3</sup> /s/m; (c) através do método B para q=25 m <sup>3</sup> /s/m; (d) através do método B para q=30 m <sup>3</sup> /s/m. Fonte: adaptado de Calitz (2015).	62
Figura 31 - Geometria dos pilares implementados no modelo físico do vertedouro em degraus Tipo A da pesquisa de Koen (2017). Fonte: adaptado de Koen (2017).	63
Figura 32 - Geometria dos pilares implementados no modelo físico do vertedouro em degraus Tipo B da pesquisa de Koen (2017). Fonte: adaptado de Koen (2017).	64
Figura 33 – Comparação do escoamento para a vazão específica de 50 m <sup>3</sup> /s/m para o vertedouro em degraus com (a) pilar FGP-Y, (b) pilar FGP-X e pilar FGP-Y + defletor. Fonte: adaptado de Koen, Bosman e Basson (2019).	65
Figura 34 - Análise da cavitação a partir de dados de concentração de ar e pressões mínimas para o vertedouro em degraus com (a) pilar FGP-Y e (b) pilar FGP-X. Fonte: adaptado de Koen, Bosman e Basson (2019).	66
Figura 35 – Pressões médias adimensionalizadas (a) patamares e (b) espelhos do estudo de Canellas et al. (2017). Fonte: adaptado de Canellas et al. (2017).	67
Figura 36 – Vista geral do modelo físico do vertedouro em degraus instalado no LOH.	70
Figura 37 - Detalhe da crista do vertedouro em degraus (dimensões em metros)	71
Figura 38 - Vista superior do vertedouro em degraus LOH I (dimensões em metros)	71
Figura 39 – Vista lateral do vertedouro em degraus do LOH I (dimensões em metros)	72
Figura 40 – Detalhe (a) dos pilares e (b) do defletor (dimensões em metros)	73
Figura 41 – (a) Vista superior do modelo do LOH I com pilares e defletor instalados e (b) visualização do superior do escoamento	74
Figura 42 – (a) Vista lateral e (b) vista frontal do modelo do LOH I com pilares e defletor instalados.	74
Figura 43 - Sistema de (a) armazenamento de água e (b) alimentação do modelo.	75
Figura 44 - (a) Poço tranquilizador e (b) canal de montante.	75
Figura 45 – Vista superior do vertedouro em degraus do LAHE	76
Figura 46 - Vista lateral do vertedouro em degraus do LAHE	77
Figura 47 - Detalhe dos pilares	78
Figura 48 - Defletores (a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm e (d) 9 mm.	79
Figura 49 – (a) Vista superior, (c) Vista lateral do modelo do LAHE com pilares e defletor instalados, (b) Pilares e (d) Pilares e defletor instalados no modelo do LAHE	80

Figura 50 – Posição das tomadas de pressão dos dois modelos.....	82
Figura 51 - Medição do nível de água (a) a montante da crista do vertedouro (b) no fim da ogiva e início do primeiro degrau no modelo instalado no LAHE .....	87
Figura 52 – Visualização do escoamento e identificação do lançamento do escoamento e posição do impacto do jato d'água (a) Vertedouro em degraus LAHE (b) Vertedouro em degraus LOH I .....	87
Figura 53 – Visualização do escoamento para identificação das posições de início de aeração (a) Vertedouro em degraus LAHE (b) Vertedouro em degraus LOH I.....	88
Figura 54 – Aeradores instalados no modelo (a) Vista lateral e (b) vista superior.....	89
Figura 55 - Esquema de configuração de ensaios (a) Vista lateral aeração natural, (b) vista superior aeração natural, (c) Vista lateral aeração induzida por pilares, (d) vista superior aeração induzida por pilares (sem defletor), (e) Vista lateral aeração induzida por pilares + defletor, (f) vista superior aeração induzida por pilares + defletor. ....	90
Figura 56 - Visualização do escoamento sobre vertedouro em degraus LOH I com aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para a vazão específica de 0,200 m <sup>3</sup> /s/m (a) Vista lateral do início da calha em degraus, (b) Vista lateral do centro da calha em degraus e (c) Vista frontal da calha em degraus.....	94
Figura 57 – Visualização da aeração inferior e superior parcial e total do escoamento sobre vertedouro em degraus LOH I com aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para a vazão específica de 0,200 m <sup>3</sup> /s/m (a) Vista lateral do centro da calha em degraus, (b) Vista lateral do fim da calha em degraus e (c) Vista frontal da calha em degraus.....	95
Figura 58 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	96
Figura 59 - Comparação da pressão média entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a) q = 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) q = 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) q = 0,200 m <sup>3</sup> /s/m, (d) q = 0,275 m <sup>3</sup> /s/m .....	98
Figura 60 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	100
Figura 61 - Comparação da pressão média entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a) q = 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) q = 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) q = 0,200 m <sup>3</sup> /s/m, (d) q = 0,275 m <sup>3</sup> /s/m .....	101
Figura 62 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	102
Figura 63 - Comparação da flutuação de pressão entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a) q = 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) q = 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) q = 0,200 m <sup>3</sup> /s/m, (d) q = 0,275 m <sup>3</sup> /s/m .....	104
Figura 64 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	105
Figura 65 - Comparação da flutuação de pressão entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a) q = 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) q = 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) q = 0,200 m <sup>3</sup> /s/m, (d) q = 0,275 m <sup>3</sup> /s/m .....	106
Figura 66 - Comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de (a) 0,1% e (b) 1,0% para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	108
Figura 67 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a) q = 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) q = 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) q = 0,200 m <sup>3</sup> /s/m, (d) q = 0,275 m <sup>3</sup> /s/m.....	109
Figura 68 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 1,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6	

mm para os patamares dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	110
Figura 69 - Comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de (a) 99,0% e (b) 99,9% para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	111
Figura 70 - Comparação das pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	113
Figura 71 - Comparação das pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	114
Figura 72 - Comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de (a) 0,1% e (b) 1,0% para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	115
Figura 73 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	117
Figura 74 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 1,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	118
Figura 75 - Comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de (a) 99,0% e (b) 99,9% para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I.....	119
Figura 76 - Comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de 99,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	121
Figura 77 - Comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de 99,9% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a) $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c) $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d) $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	122
Figura 78 – Visualização do escoamento sobre vertedouro de degrau com aeração natural, para vazão específica de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	124
Figura 79 – Desenho esquemático do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida por pilares.....	125
Figura 80 – Aeração inferior da aeração induzida por pilares e vazão de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	126
Figura 81 – Aeração superior parcial e total da aeração induzida por pilares para a vazão específica de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	127
Figura 82 – Desenho esquemático do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm .....	128
Figura 83 – Região sem aeração e aeração inferior da aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm para vazão específica de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	129
Figura 84 – Região de aeração superficial parcial e total da aeração induzida por pilares + defletores 0 mm para vazão específica de $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ .....	129
Figura 85 - Desenho esquemático do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida por pilares + defletor de 3, 6 e 9 mm.....	130

Figura 86 – Vista lateral da formação do jato de água para a vazão de 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm.....	131
Figura 87 - Vista diagonal da aeração inferior para a vazão de 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm .....	132
Figura 88 - Vista lateral da aeração superficial parcial para a vazão de 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm.....	133
Figura 89 - Vista superior da aeração superficial parcial para a vazão de 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm.....	133
Figura 90 – Posição características do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida (a) posição de impacto do jato de água e (b) posição de início da aeração inferior .....	134
Figura 91 - Posição de início da aeração superficial parcial para aeração natural e induzida .....	135
Figura 92 - Posições características do escoamento com aeração induzida adimensionalizados e equações ajustadas (a) posição de impacto do jato, (b) posição de início da aeração inferior e (c) posição de início da aeração superficial parcial .....	137
Figura 93 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm .....	139
Figura 94 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m.....	143
Figura 95 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm .....	146
Figura 96 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	149
Figura 97 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm .....	151
Figura 98 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	154
Figura 99 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm .....	156
Figura 100 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	158

Figura 101 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	161
Figura 102 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	162
Figura 103 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	164
Figura 104 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	165
Figura 105 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	167
Figura 106 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	168
Figura 107 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m.....	170
Figura 108 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m.....	171
Figura 109 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	174
Figura 110 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	175
Figura 111 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	177
Figura 112 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	178
Figura 113 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração	

induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	180
Figura 114 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm .....	181
Figura 115 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	184
Figura 116 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,150 m <sup>3</sup> /s/m, (c) vazão específica 0,275 m <sup>3</sup> /s/m e (d) vazão específica 0,356 m <sup>3</sup> /s/m .....	185
Figura 117 - Comportamento das pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% (P <sub>0,1%</sub> ) dos patamares .....	187
Figura 118 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% (P <sub>0,1%</sub> ) dos patamares .....	187
Figura 119 - Comportamento das pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% (P <sub>0,1%</sub> ) dos espelhos .....	189
Figura 120 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% (P <sub>0,1%</sub> ) dos espelhos .....	190
Figura 121 - Comparação entre a posição longitudinal em que ocorre a menor pressão mínima nos espelhos e patamares .....	191
Figura 122 – Comportamento dos adimensionais dos menores valores de pressão mínima com probabilidade de não-excedência de 0,1% de ocorrência para (a) patamar e (b) espelho .....	193
Figura 123 - Comportamento dos adimensionais das posições em que ocorrem as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% (P <sub>0,1%</sub> ) dos espelhos para (a) patamar e (b) espelho .....	194
Figura 124 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos patamares .....	196
Figura 125 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos espelhos .....	197
Figura 126 - Comportamento das pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% (P <sub>99,9%</sub> ) dos patamares .....	198
Figura 127 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% (P <sub>99,9%</sub> ) dos patamares .....	199
Figura 128 - Comportamento das pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% (P <sub>99,9%</sub> ) dos espelhos .....	200
Figura 129 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% (P <sub>99,9%</sub> ) dos espelhos .....	201
Figura 130 - Comparação entre a posição longitudinal em que ocorre a maior pressão máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% (P <sub>99,9%</sub> ) nos espelhos e patamares .....	203

Figura 131 - Comportamento dos adimensionais dos maiores valores de pressão máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% de ocorrência para (a) patamar e (b) espelho.....	204
Figura 132 - Comportamento dos adimensionais das posições em que ocorrem as maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% dos espelhos para (a) patamar e (b) espelho.....	206
Figura 133 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos patamares.....	207
Figura 134 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos espelhos.....	208
Figura 135 - Comparação do comportamento das pressões mínimas ao longo dos modelos de vertedouros em degraus do LAHE e do estudo de Calitz (2015).....	210
Figura 136 – (a) Coeficiente de assimetria, (b) coeficiente de curtose para a aeração induzida por pilares do modelo do LAHE.....	211
Figura 137 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	228
Figura 138 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	229
Figura 139 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	230
Figura 140 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	231
Figura 141 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	232
Figura 142 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	233
Figura 143 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	234
Figura 144 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	235
Figura 145 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m.....	236



Figura 146 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m .....	237
Figura 147 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m .....	238
Figura 148 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m <sup>3</sup> /s/m, (b) vazão específica 0,200 m <sup>3</sup> /s/m e (c) vazão específica 0,330 m <sup>3</sup> /s/m .....	239

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações para predição de concentração de ar ao longo da parte inferior da calha.....	53
Tabela 2 - Características dos vertedouros em degraus utilizados no estudo de Mojtaba et al. 2015.....	56
Tabela 3 - Faixa de operação dos transdutores ao longo da calha em degraus no modelo físico vertedouro em degraus do LOH .....	84
Tabela 4 - Degraus instrumentados com piezômetro e transdutores de pressão no modelo físico vertedouro em degraus do LAHE .....	85
Tabela 5 - Faixa de operação dos transdutores ao longo da calha em degraus no modelo físico vertedouro em degraus do LAHE .....	86
Tabela 6 – Vazões totais e específicas do escoamento em modelo e protótipo e número de Froude rugoso .....	89
Tabela 7 - Comparação das principais características do modelo do LAHE e do modelo utilizado por Calitz (2015). .....	93
Tabela 8 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 10 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para cada posição característica.....	138
Tabela 9 – Coeficientes a, b e c obtidos para a Equação 11 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos patamares e espelhos .....	193
Tabela 10 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 14 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das posições longitudinais em que ocorrem as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos patamares e espelhos.....	195
Tabela 11 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 13 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos patamares e espelhos .....	205
Tabela 12 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 14 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das posições longitudinais em que ocorrem as maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos patamares e espelhos .....	206

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_b$	Concentração de ar junto ao fundo da calha (adimensional)
$C_{bu}$	Concentração de ar inferior uniforme (adimensional)
$C_p$	Coefficiente de pressão (adimensional)
$C_{pm}$	Coefficiente de pressão média (adimensional)
$C_{pa}$	Coefficiente de pressão extremo (adimensional)
$d_i$	Profundidade do escoamento no início da aeração (m)
$F^*$	Número de Froude rugoso (adimensional)
$g$	Aceleração da gravidade (m/s <sup>2</sup> )
$h_a$	Profundidade do escoamento na posição de início de aeração superficial parcial (m)
$h_c$	Altura crítica do escoamento (m)
$h_d$	Altura do degrau (m)
$H_m$	Energia a montante da crista (m)
$h_n$	Profundidade uniforme do escoamento, na posição de início de aeração superficial total (m)
$K$	Altura de rugosidade do degrau (m)
$L$	Distância longitudinal a partir do início da ogiva até a posição de referência (m)
$L_a$	Distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início de aeração superficial parcial (m)
$l_d$	Largura do degrau (m)
$L_f$	Distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início de aeração inferior (m)
$L_i$	Distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de referência (m)
$L_{ij}$	Distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição do impacto do jato (m)
$L_n$	Distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início de aeração superficial total (m)
$P$	Pressão local (N/m <sup>2</sup> )
$P/\gamma$	pressão medida no modelo (m.c.a.)
$P_{0,1\%}$	Pressão com probabilidade de 0,1% de não-excedência (m.c.a.)

$P_{1,0\%}$	Pressão com probabilidade de 1,0% de não-excedência (m.c.a.)
$P_{99,0\%}$	Pressão com probabilidade de 99,0% de não-excedência (m.c.a.)
$P_{99,9\%}$	Pressão com probabilidade de 99,9% de não-excedência (m.c.a.)
$P_{atm}$	Pressão atmosférica (N/m <sup>2</sup> )
$P_m$	Pressão média (m.c.a.)
$P_v$	Pressão de vapor (N/m <sup>2</sup> )
$q$	Vazão específica (m <sup>3</sup> /s/m)
$Q$	Vazão (l/s)
$s'$	Adimensional de posição longitudinal (adimensional) $s' = \frac{(L_i - L_a)}{d_i}$
$s_i$	Adimensional de posição (adimensional) $s_i = \frac{L_i - L_a}{H_m}$
$t$	Espessura do defletor em relação ao pseudofundo (m)
$t_v$	Tensão relativa de vapor da água (N/m <sup>2</sup> )
$v$	Velocidade média do escoamento (m/s)
$\alpha$	Declividade da calha (°)
$\sigma$	Índice de cavitação (adimensional)
$\sigma_c$	Índice de cavitação crítico (adimensional)
$\sigma_x$	Flutuação de pressão (m.c.a.)
$\phi$	Ângulo de defletor (°)
$\gamma$	Peso específico da água (N/m <sup>3</sup> )
$\rho$	Massa específica da água (kg/m <sup>3</sup> )
$f_{eq}$	Fator de resistência ao escoamento de Darcy-Weisbach (adimensional)

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Objetivo Geral .....	25
1.2 Objetivos Específicos .....	25
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 Vertedouros em degraus .....	27
2.2 Regime de escoamento.....	28
2.3 Aeração do escoamento.....	30
2.4 Estudo de pressões sobre a calha do vertedouro para a aeração natural do escoamento.....	33
2.5 Cavitação em vertedouros.....	41
2.6 Aeração induzida.....	43
2.6.1 Aeradores em vertedouros de calha lisa .....	44
2.6.2 Aeradores em vertedouros em degraus .....	51
3 METODOLOGIA .....	69
3.1 Instalação Experimental .....	69
3.1.1 Instalação Experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS .....	69
3.1.2 Instalação Experimental do Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas.....	75
3.2 Coleta de dados .....	81
3.2.1 Pressões ao longo da calha .....	81
3.2.1.1 Aquisição de pressões ao longo da calha do modelo experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS .....	82
3.2.1.2 Aquisição de pressões ao longo da calha do modelo experimental do Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas .....	84
3.2.2 Níveis de água.....	86
3.2.3 Comportamento e aeração do escoamento ao longo da calha.....	87
3.3 Condição de ensaio.....	88
3.4 Metodologia analítica.....	91
3.5 Comparação dos resultados – Estudo de Calitz (2015) .....	92
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	94
4.1 Resultados da Instalação Experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas – LOH- UFRGS .....	94
4.1.1 Comportamento do escoamento ao longo do vertedouro em degraus – Modelo LOH I.....	94
4.1.2 Comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	96

4.1.3 Comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	99
4.1.4 Comportamento das pressões flutuantes dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	102
4.1.5 Comportamento das pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	105
4.1.6 Comportamento das pressões extremas dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	107
4.1.6.1 Comportamento das pressões extremas mínimas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	107
4.1.6.2 Comportamento das pressões extremas máximas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	111
4.1.6.3 Comportamento das pressões extremas mínimas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	115
4.1.6.4 Comportamento das pressões extremas máximas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	119
4.2 Resultados da Instalação Experimental do Laboratório de Hidráulica Experimental – FURNAS Centrais Elétricas.....	123
4.2.1 Comportamento do escoamento ao longo do vertedouro em degraus – Modelo LAHE .....	123
4.2.2 Comportamento das posições características do escoamento com aeração induzida .....	133
4.2.3 Comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	138
4.2.4 Comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	145
4.2.5 Comportamento das pressões flutuantes dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	150
4.2.6 Comportamento das pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	155
4.2.7 Comportamento das pressões extremas dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	159
4.2.7.1 Comportamento das pressões extremas mínimas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	159
4.2.7.2 Comportamento das pressões extremas mínimas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	166
4.2.7.3 Comportamento das pressões extremas máximas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	172
4.2.7.4 Comportamento das pressões extremas máximas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	179
4.2.8 Comportamento das menores pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% dos patamares e espelhos dos degraus.....	186

4.2.9 Comportamento das maiores pressões extremas máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% dos patamares e espelhos dos degraus.....	198
4.3 Comparações dos resultados .....	210
5 CONCLUSÕES.....	214
6 RECOMENDAÇÕES .....	221
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	222
Apêndices.....	227
Apêndice 1 – Comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	228
Apêndice 2 – Comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	229
Apêndice 3 – Comportamento das pressões flutuantes dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	230
Apêndice 4 – Comportamento das pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro .....	231
Apêndice 5 – Comportamento das pressões extremas mínimas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	232
Apêndice 6 – Comportamento das pressões extremas mínimas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	234
Apêndice 7 – Comportamento das pressões extremas máximas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	236
Apêndice 8 – Comportamento das pressões extremas máximas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro.....	238

## 1 INTRODUÇÃO

Vertedouros são estruturas hidráulicas que permitem escoar o excesso de água de um reservatório, durante a ocorrência de cheias, de forma segura. Com o desenvolvimento de barragens durante o século 20, os vertedouros foram projetados com alturas cada vez maiores e para grandes vazões específicas. Porém, as altas velocidades que escoam sobre o vertedouro, associadas a regiões de baixa pressão, podem causar danos resultantes de erosão e/ou da cavitação, colocando em risco a integridade destas estruturas.

Os vertedouros em degraus têm se tornado uma adequada alternativa pela facilidade de construção e economia, especialmente a partir da década de 1970, com o surgimento da tecnologia de concreto compactado com rolo (CCR). Outra vantagem da utilização deste tipo de estrutura é a significativa dissipação de energia, que ocorre durante a queda do escoamento pela calha. Com isso as estruturas de dissipação da energia residual, instaladas a jusante dos vertedouros, podem ter suas dimensões e custos reduzidos, quando comparada à utilização de um vertedouro com calha lisa.

A macrorrugosidade imposta pelos degraus do vertedouro faz com que o ponto de início de aeração seja antecipado e que uma maior quantidade de ar seja incorporada ao escoamento, reduzindo a ocorrência de danos por cavitação. No entanto, na região não aerada do escoamento, a montante do ponto de início de aeração, a estrutura está mais propensa a riscos de cavitação e/ou erosão nos degraus, as quais estão associados à ocorrência de variações significativas de pressões.

Estudos constataram que a implementação dos vertedouros em degraus está limitada a uma faixa de vazões específicas, em virtude do risco de danos por cavitação. Para Gomes (2006) as máximas vazões específicas que levariam à ocorrência de cavitação são em torno de 11,3 a 15,6 m<sup>3</sup>/s/m. Já para Matos et al. (2000) o valor estaria compreendido entre 20 a 30 m<sup>3</sup>/s/m, e para Amador (2005), a cavitação pode ocorrer de forma incipiente para vazões específicas entre 11,5 a 14,0 m<sup>3</sup>/s/m, pois a quantidade de ar presente no escoamento é insuficiente para proteger a superfície sólida de danos decorrentes da cavitação.

Considerando a demanda por vazões mais altas e as vantagens associadas aos vertedouros em degraus, é importante prever maneiras de prevenção aos danos



de cavitação e/ou erosão nestas estruturas e, uma das formas, é aumentar a concentração de ar no escoamento a montante da posição de início de aeração, o que pode ser alcançado através da aeração induzida.

Estudos sobre vertedouros em degraus com aeração induzida, ou seja, com a introdução de ar no escoamento através de dispositivos aeradores, defletores, pilares, entre outros, foram desenvolvidos por pesquisadores, podendo citar Pfister et al. (2006a), Pfister et al. (2006b), Zamora et al. (2008), Zamora et al. (2009), Wang et al. (2012), Mojtaba et al. (2015), Calitz (2015), Terrier (2016) e Koen (2017), os quais visavam aumentar a faixa operacional de vazões específicas possíveis de serem descarregadas nos vertedouros em degraus sem causar danos às estruturas hidráulicas.

Vertedouros em degraus com aeração induzida por pilares foram estudados por poucos pesquisadores. Na China foram construídos alguns vertedouros em degraus com aeração induzida por pilar, como relatado por Terrier (2016). Na barragem de Dachaoshan na China (que possui 111 metros de altura, degraus com 1 m de altura e vazão unitária de  $165 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (Figura 1) foram instalados pilares para induzir a aeração do escoamento, contraindo o fluxo de água, fazendo com que o ar seja incorporado ao escoamento, associado a uma diferença de ângulo entre a ogiva e a calha em degraus (defletor), criando uma cavidade de ar ao longo dos seis primeiros degraus. Os pilares também foram instalados na barragem de Murum, na Malásia com 146 m de altura e vazão específica de  $39 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , e foi testada por Wang et al. (2012) em um modelo físico.



Figura 1 - Barragem de Dachaoshan na China vertedouro em operação. Fonte: Terrier (2016)

As investigações em modelos físicos do comportamento hidráulico do escoamento através da implementação de pilares em vertedouros em degraus também foram estudadas por Calitz (2015) e Koen (2017). Os autores visavam antecipar a posição de início da aeração e, assim, aumentar a vazão específica recomendada pela literatura, sem riscos de danos por cavitação.

Calitz (2015) testou dois diferentes tipos de pilares e concluiu que o pilar com extremidade arredondada e curto, onde sua extremidade final termina na ogiva, permitirá que um vertedouro em degraus descarregue, com segurança, vazões específicas até  $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , sem risco de danos por cavitação na estrutura.

A partir dos resultados e recomendações de Calitz (2015), Koen (2017) avaliou a influência de diferentes geometrias e comprimentos de pilares, inclusive da geometria do pilar instalado na barragem de Dachaoshan e obteve resultados satisfatórios.

Apesar dos estudos até então realizados sobre os vertedouros em degraus com aeração induzida, ainda existem lacunas de conhecimento, principalmente relacionadas à antecipação da aeração do escoamento e o estudo da caracterização da distribuição longitudinal das pressões em vertedouros em degraus com aeração induzida.

## **1.1 Objetivo Geral**

O objetivo desta pesquisa é avaliar as características do escoamento e os esforços hidrodinâmicos atuantes em vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e pilares + defletores, através da análise das pressões atuantes nas quinas dos degraus ao longo da calha.

## **1.2 Objetivos Específicos**

Para atingir o objetivo geral, pontuam-se os objetivos específicos, sendo eles:

- Caracterização do comportamento do escoamento em vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e pilares + defletores sob diferentes condições de vazão.
- Definição das posições características do escoamento em vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e pilares + defletores e de

parâmetros adimensionais para permitir a previsão destas posições ao longo da calha.

- Caracterização da distribuição longitudinal das pressões médias, flutuantes e extremas mínimas e máximas verificadas experimentalmente nas quinas dos patamares e espelhos dos degraus do vertedouro com aeração induzida por pilares e pilares + defletores sob diferentes condições de vazão.
- Comparação da distribuição longitudinal das pressões médias, flutuantes e extremas nas quinas dos degraus do vertedouro com aeração induzida por pilares e pilares + defletores com a distribuição longitudinal das pressões nas quinas dos degraus do vertedouro com aeração natural.
- Caracterização das menores pressões extremas mínimas, das maiores pressões extremas máximas e de suas respectivas posições longitudinais e definição de parâmetros adimensionais para permitir a previsão dos menores e maiores valores de pressão extrema que podem ocorrer nas quinas dos degraus e da sua respectiva posição ao longo da calha em degraus do vertedouro.
- Comparação das pressões extremas mínimas dos espelhos do vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares com os dados do estudo de Calitz (2015).

Com esses objetivos específicos, a influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus será investigada a partir da comparação do comportamento do escoamento e da distribuição longitudinal das pressões atuantes nas quinas dos degraus do vertedouro com aeração induzida e aeração natural.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Vertedouros em degraus

Os vertedouros em degraus são caracterizados pela significativa dissipação de energia associada à macrorrugosidade que é imposta pelos degraus. Com isso, a construção da calha do vertedouro em degraus faz com que a energia cinética do escoamento seja dissipada durante a queda, ainda na calha do vertedouro, diminuindo assim, as dimensões e os custos da estrutura de dissipação a jusante do vertedouro.

Os vertedouros em degraus são estruturas que vêm sendo utilizadas desde a Antiguidade devido à simplicidade da forma e estabilidade da estrutura (Chanson, 1995). De acordo com Chanson, Yasuda e Ohtsu (2002), o mais antigo vertedouro em degraus que se tem conhecimento é o de uma barragem na Akarnania, na Grécia, construída por volta de 1.300 a.C. (Figura 2 (a)), com 10,5 m de altura, 25 m de comprimento, declividade média de  $45^\circ$  (variando entre  $39^\circ$  e  $73^\circ$ ) e altura de degraus variando de 0,6 a 0,9 m.

Outras barragens providas de vertedouros em degraus foram construídas no Iraque, Síria, Líbia, Tunísia e Espanha (Chanson, 1994a; Chanson, 1995).

Conforme Chanson (1995), possivelmente, a primeira barragem com vertedouro em degraus construído com a função principal de dissipar a energia do escoamento foi na barragem de New Croton, construído em 1906 (Figura 2 (b)). O vertedouro da barragem de New Croton possui 90,5 m de altura, declividade de  $53^\circ$ , e degraus com altura de 2,13 m.

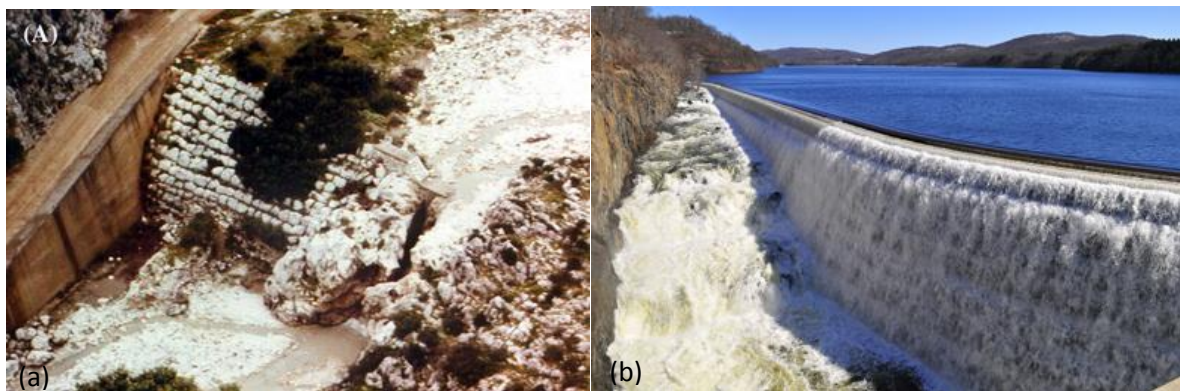


Figura 2 – (a) Barragem de Arkanania, Grécia. Fonte: Chanson (2015) (b) Barragem de New Croton, Estados Unidos. Fonte: Miguel (2016).

Uma expressiva quantidade de vertedouros em degraus foi construída até o século 20, após, os vertedouros com calha lisa foram preferidos, devido a maior capacidade de descarga e facilidade de construção, além do desenvolvimento de dissipadores de energia por ressalto hidráulico no pé de barragens (Chanson, 1995).

Apenas a partir da década de 70, com o surgimento de novos materiais e técnicas construtivas, como o concreto compactado com rolo (CCR) e as estruturas em gabiões, é que o interesse por calhas em degraus voltou a atrair pesquisadores e profissionais da engenharia hidráulica (Dai Prá et al., 2016). A técnica CCR torna a obra mais econômica e facilita a construção da barragem, pois o concreto é lançado em camadas e compactado com rolo, facilitando a construção de degraus.

A década de 1980 pode ser considerada decisiva em relação à aplicação de vertedouros em degraus, principalmente em grandes barragens. No final de 1986, havia apenas 15 barragens em CCR no mundo, mas a partir desse período as barragens em CCR ganharam ampla aceitação, devido vantagem econômica combinada com sua segurança a longo prazo (Matos e Meireles, 2014).

Os vertedouros em degraus permitem a dissipação da energia ainda na calha do vertedouro, por meio da intensa turbulência provocada pelos degraus, que tendem a antecipar a aeração, reduzindo na ordem de 70% da energia total a montante, conforme Conterato, Marques e Alves (2015). Isto permite a diminuição das dimensões e dos custos da estrutura de dissipação a jusante do sistema extravasor.

A caracterização hidráulica do escoamento é essencial para o projeto do vertedouro em degraus. O projeto hidráulico requer a determinação do regime de escoamento, a energia residual, onde e como se desenvolve a aeração e a caracterização as pressões atuantes sobre os degraus da calha do vertedouro, para evitar danos devido à ocorrência do fenômeno de cavitação e/ou erosão.

## **2.2 Regime de escoamento**

O tipo de regime de escoamento em vertedouros em degraus depende basicamente da profundidade crítica do escoamento, que é função da vazão específica, da altura dos degraus do vertedouro e da inclinação de sua calha.

O escoamento sobre vertedouros em degraus pode ser caracterizado em três regimes diferentes: o escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*), que ocorre

para vazões específicas menores e a água escoar em uma série de mergulhos de um degrau para o outro, impactando cada degrau (Figura 3 (c)); o escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*), que ocorre para vazões específicas maiores e é caracterizado por um fluxo principal deslizando sobre os degraus (Figura 3 (a)); e, o escoamento de transição, um regime intermediário entre o regime de escoamento em quedas sucessivas e o escoamento deslizante sobre turbilhões (Figura 3 (b)).

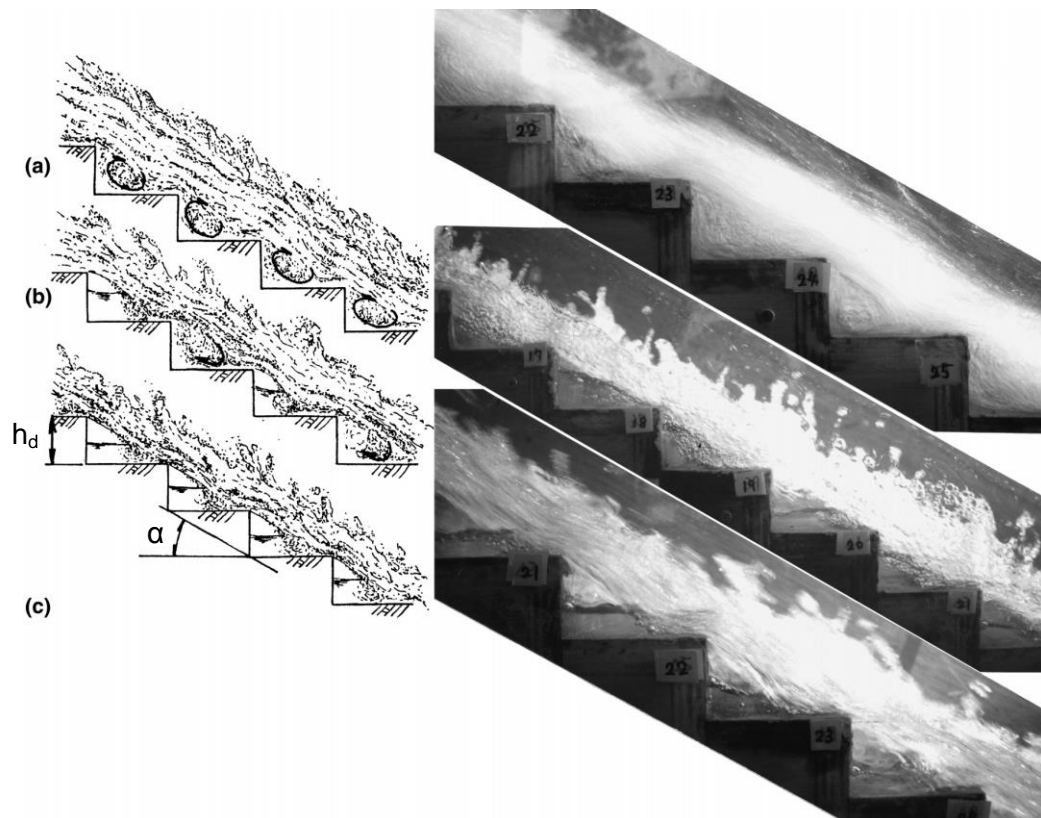


Figura 3 - Regimes de escoamento sobre vertedouro em degraus (a) escoamento deslizante sobre turbilhões (*Skimming Flow*); (b) Escoamento de transição; (c) escoamento em quedas sucessivas (*Nappe Flow*). Fonte: Ohtsu, Yasuda e Takahashi (2001).

Os vertedouros são projetados para o regime de escoamento deslizante sobre turbilhões (Chanson, 2001; Ohtsu, Yasuda e Takahashi, 2004; Gonzalez, Takahashi e Chanson, 2008), pois vazões específicas mais altas são de maior interesse para este tipo de obra hidráulica. Assim, esse regime de escoamento é o objetivo da presente pesquisa.

De acordo com Chanson (1994b), o regime de escoamento deslizante sobre turbilhões caracteriza-se por um escoamento principal deslizando sobre os degraus. Os vértices externos dos degraus formam um pseudofundo sobre o qual o

escoamento desliza e abaixo forma-se um vórtice de recirculação de água retido na cavidade entre os degraus, que se mantém devido à transmissão da quantidade de movimento entre a corrente principal e os turbilhões. Essas condições são caracterizadas por um alto nível de turbulência e uma grande quantidade de entrada de ar (Osmar, 2016), sendo a dissipação de energia do escoamento principal devido aos vórtices de recirculação (Ohtsu, Yasuda e Takahashi, 2001).

### 2.3 Aeração do escoamento

No escoamento principal do regime deslizante sobre turbilhões ocorrem regiões distintas ao longo da calha, sendo que próximo à crista do vertedouro o escoamento é não aerado e a jusante, geralmente na região média e inferior do vertedouro, observa-se um escoamento aerado (Simões, 2008).

Na região não aerada o escoamento apresenta um aspecto bem definido, transparente e sem bolhas de ar. À medida que o escoamento se desenvolve, a espessura da camada limite cresce gradualmente a partir da crista do vertedouro, até que a mesma atinja a superfície livre do escoamento. Nessa região, denominado por Chanson (1994a) como ponto de incipiência da aeração, ocorre a incorporação de ar da atmosfera no escoamento e o processo de aeração se inicia, tornando o escoamento irregular e instável (Figura 4).

Chanson (1994a) divide o escoamento em regime deslizante sobre turbilhões em três diferentes regiões (Figura 4):

- Zona sem aeração do fluxo: ocorre no trecho inicial da calha, onde no interior se desenvolve a camada limite, até atingir a superfície livre, ponto a partir do qual se inicia o processo de aeração natural do escoamento;
- Zona de escoamento gradualmente variado: caracterizada por fluxos aerados com concentrações de ar variáveis ao longo da calha;
- Zona do escoamento uniforme: região onde, para uma mesma vazão, tem-se um escoamento com profundidades, concentração de ar e distribuições médias de velocidades constantes. Neste regime de escoamento verifica-se uma profundidade uniforme do escoamento ( $h_n$ ).



Figura 4 - Desenvolvimento da aeração em uma calha em degraus. Fonte: adaptado de Chanson (1994a)

A região crítica de um vertedouro em degraus é a região localizada próxima à crista do vertedouro, em virtude da ausência de aeração no escoamento. A aeração altera as propriedades da massa fluida e, conforme Simões (2008), a água, a partir do ponto de início da aeração passa a ser uma mistura bifásica do tipo ar-água, onde sua compressibilidade reduz significativamente os danos causados por cavitação.

A zona não aerada possui maior velocidade de escoamento e, portanto, maiores pressões, aumentando o potencial de dano de cavitação. Desta forma, a localização do ponto de início de aeração é importante para avaliar a área mais propensa ao risco de cavitação.

Através de medições experimentais em modelos de vertedouros em degraus, diversos autores sugeriram equações para a previsão da posição de início de aeração e da profundidade do escoamento neste ponto. Conterato, Marques e Alves (2015), a partir dos resultados obtidos na sua pesquisa e de diferentes autores, que estudaram estruturas com declividades e degraus diferentes entre si, apresentaram a Equação 1, que representa o comportamento do comprimento do início da aeração para vertedouro em degraus.



$$\frac{L_a}{K} = 12F^{*(2/3)}$$

Equação 1

Onde:

$L_a$  = Distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início de aeração (m);

$K$  = altura de rugosidade do degrau (m) (Figura 5);

$F^*$  = Número de Froude rugoso (adimensional) (Equação 2).

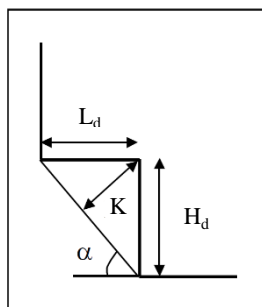


Figura 5 - Dimensões da calha em degrau. Fonte: Dai Prá (2004).

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \operatorname{sen} \alpha K^3}}$$

Equação 2

Onde:

$l_d$  = comprimento do degrau (m);

$h_d$  = altura do degrau (m);

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

$g$  = aceleração da gravidade ( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$\alpha$  = declividade da calha ( $^\circ$ );

Através da Equação 1 se pode calcular o ponto de início de aeração, que é importante para o dimensionamento dos vertedouros em degraus, pois a partir desta posição o escoamento adquire características instáveis, dissipando a energia cinética existente no mesmo (Canellas et al., 2017), corroborando com os resultados de Dai Prá et al. (2016), que constatou os escoamentos aerados em calhas em degraus dissipam mais energia do que escoamentos sem presença de ar em calhas lisas.

## 2.4 Estudo de pressões sobre a calha do vertedouro para a aeração natural do escoamento

Para o dimensionamento de um vertedouro em degraus é preciso conhecer as pressões atuantes na estrutura, em virtude da possibilidade da ocorrência do fenômeno da erosão e/ou cavitação nos degraus, que podem causar severos danos às estruturas, com isso, o estudo de pressões ao longo da calha do vertedouro em degraus é importante.

Com o desenvolvimento tecnológico do CCR há uma tendência de que sejam projetadas estruturas cada vez mais altas, submetidas a maiores vazões específicas e velocidades mais elevadas, as quais são favoráveis para a ocorrência da cavitação, o que causa grandes preocupações no meio técnico e científico.

Para definir a faixa de vazões específicas que podem ser suportadas pelos vertedouros, alguns pesquisadores analisaram as variações dos campos de pressão que atuam nos degraus da calha do vertedouro. Entre eles se pode relatar a pesquisa de Tozzi (1992), que analisando pressões médias em calhas com diferentes alturas de degraus e inclinação de 53,3°, observou que próximo à quina do patamar do degrau ocorrem pressões médias positivas e próximo à quina do espelho as pressões médias são negativas. O autor também observou pressões instantâneas negativas, na ordem de -0,5 m.c.a., nos espelhos de alguns degraus, indicando risco de ocorrência de cavitação. Para adimensionalizar as pressões médias, Tozzi (1992) propôs a Equação 3:

$$C_p = \frac{P/\gamma}{v^2/2g}$$

Equação 3

Onde:

$C_p$  = coeficiente de pressão (adimensional);

$P/\gamma$  = pressão medida no modelo (m.c.a.);

$v$  = velocidade média do escoamento (m/s);

Sanchez (2001) realizaram ensaios experimentais em um vertedouro em degraus com patamar de 8 cm de largura e espelho de 10 cm de altura para investigar o desenvolvimento de pressão na calha do vertedouro. As pressões

médias e extremas mínimas e máximas adimensionalizadas para os patamares estão apresentadas na Figura 6. As pressões estão adimensionalizadas pela altura do degrau ( $h_d$ ) e o adimensional de posição ( $L_i/K$ ), representa a distância da posição da crista da ogiva até o ponto de medição ( $L_i$ ) pela rugosidade do degrau ( $K$ ).

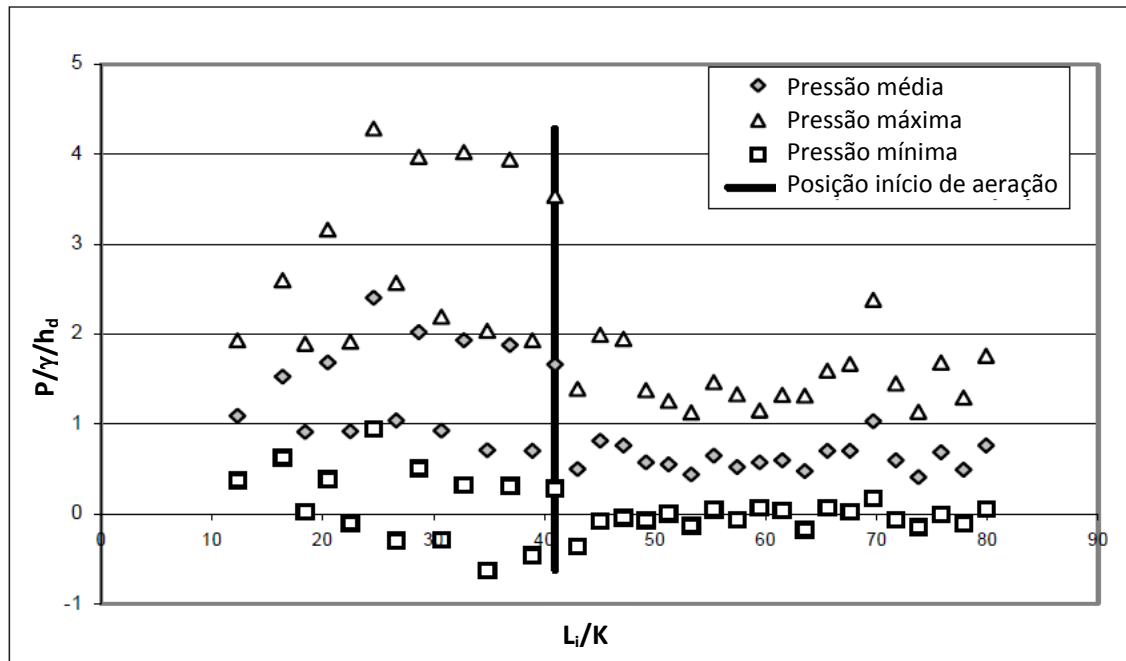


Figura 6 - Evolução da pressão ao longo da calha do vertedouro em degraus para os patamares e  $h_c/h_d = 2,246$ . Fonte: adaptado de Sanchez (2001)

Sanchez (2001) identificou que a montante do ponto de início de aeração as pressões sofrem uma maior variabilidade do que a jusante, onde o fluxo está totalmente desenvolvido. As pressões médias apresentam valores positivos e apenas as pressões extremas mínimas apresentam valores negativos.

Sanagiotto (2003) avaliou as pressões médias sobre um vertedouro em degraus com declividade de  $1V:0,75H$ . A medição das pressões foi realizada através de piezômetros e transdutores de pressão em cinco degraus, com seis tomadas de pressão, sendo que 3 localizam-se no patamar e 3 no espelho, para o degrau de 3 cm de altura e oito tomadas de pressão, para os degraus de 6 e 9 cm de altura, sendo que 4 localizam-se no patamar e 3 no espelho,

Na Figura 7 (a), (b) e (c) a autora adimensionalizou as cargas de pressões médias de acordo com a Equação 3 proposta por Tozzi (1992) e as posições das tomadas de pressão estão adimensionalizada no espelho ( $y/h_d$ ) e no patamar do

degrau ( $x/l_d$ ), sendo  $h_d$  a altura do degrau e  $l_d$  a largura do degrau e  $x$  e  $y$  as coordenadas horizontais e verticais, respectivamente (Sanagiotto, 2003).

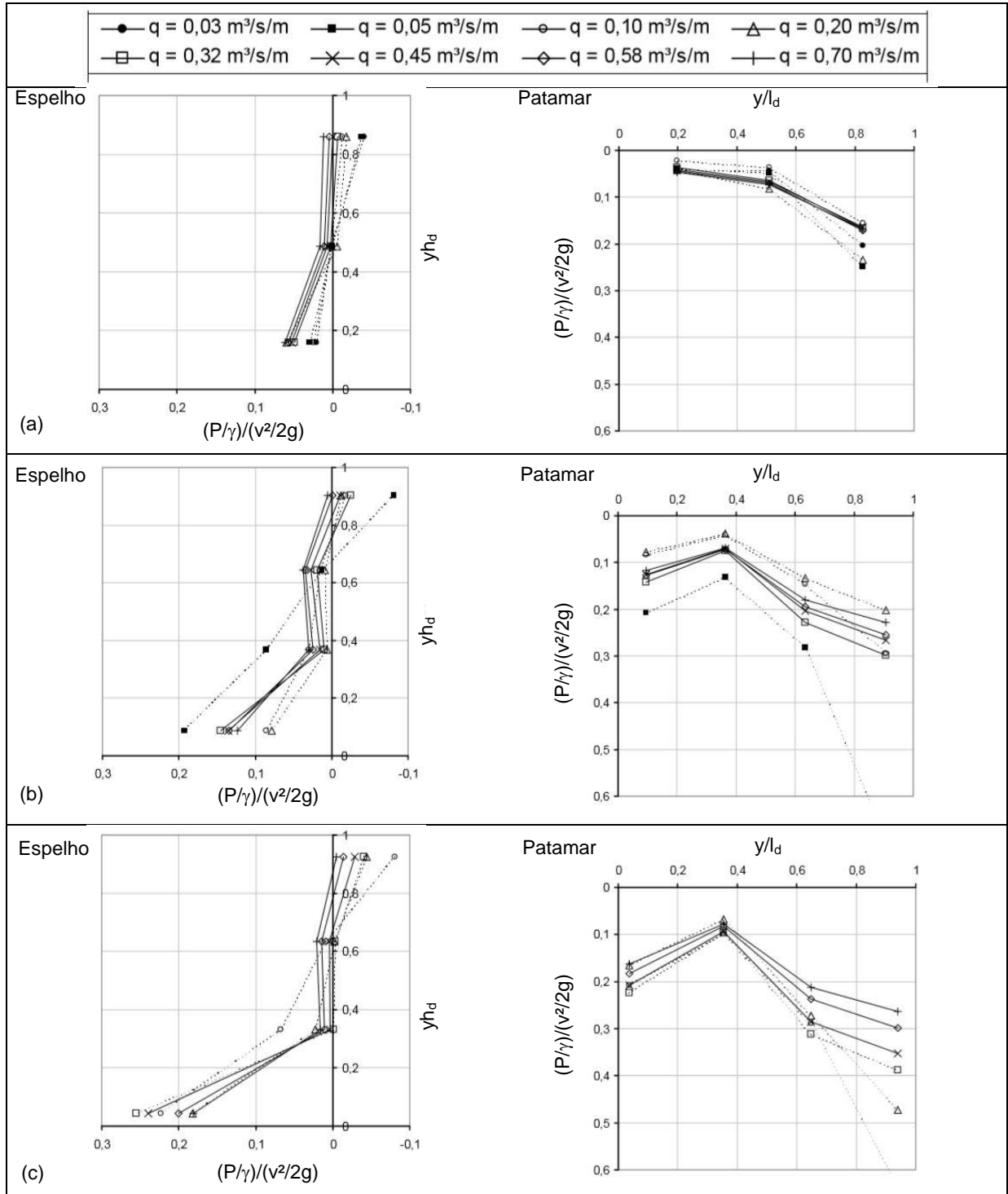


Figura 7 - Distribuição de pressões médias nas faces do espelho e patamar de um degrau de um vertedouro (a) degrau de 3 cm (b) degrau de 6 cm (c) degrau de 9 cm para  $Y/H_p = 3,81$ . Fonte: adaptado de Sanagiotto (2003).

Sanagiotto (2003) detectou que as pressões médias no patamar dos degraus se apresentam, em quase todos os casos, com valores positivos, sendo que a variação destes valores médios compreende a faixa entre -0,014 e 0,455 m.c.a., e que, conforme aumenta o tamanho do degrau as pressões no patamar também aumentam. Já no espelho do degrau foram detectadas que as pressões médias apresentam variações entre -0,062 e 0,245 m.c.a. As máximas e mínimas pressões médias, em cada degrau, ocorrem nas posições próximas ao vértice superior que delimita o pseudofundo, do patamar e do espelho, respectivamente.

Dai Prá (2004) também avaliou as características do escoamento deslizante sobre turbilhões sobre vertedouros em degraus com altura de 3, 6 e 9 cm, porém para uma calha com declividade 1V:1H. As pressões médias máximas foram verificadas junto ao vértice externo dos patamares dos degraus, ou seja, imediatamente anterior ao vértice mais a jusante dos patamares dos degraus, com valores de pressões médias entre 0,08 a 0,30 m.c.a.. Já nos espelhos houveram pressões negativas, evidenciando a presença de esforços de tração atuando no espelho do degrau. As pressões médias mínimas foram verificadas junto ao vértice externo do espelho do degrau, ou seja, imediatamente abaixo do vértice superior do degrau, com valores de pressões médias na ordem de -0,031 m.c.a., aumentando gradativamente com o aumento da vazão.

Seguindo a proposta de Tozzi (1992), Dai Prá (2004) adimensionalizou as pressões médias pela energia cinética do escoamento do degrau correspondente, conforme apresentado na Figura 8 e concluiu que para a região em que o escoamento não está aerado a distribuição das pressões é semelhante, diferente do que ocorre para a região com escoamento aerado, onde tem-se uma maior dispersão.

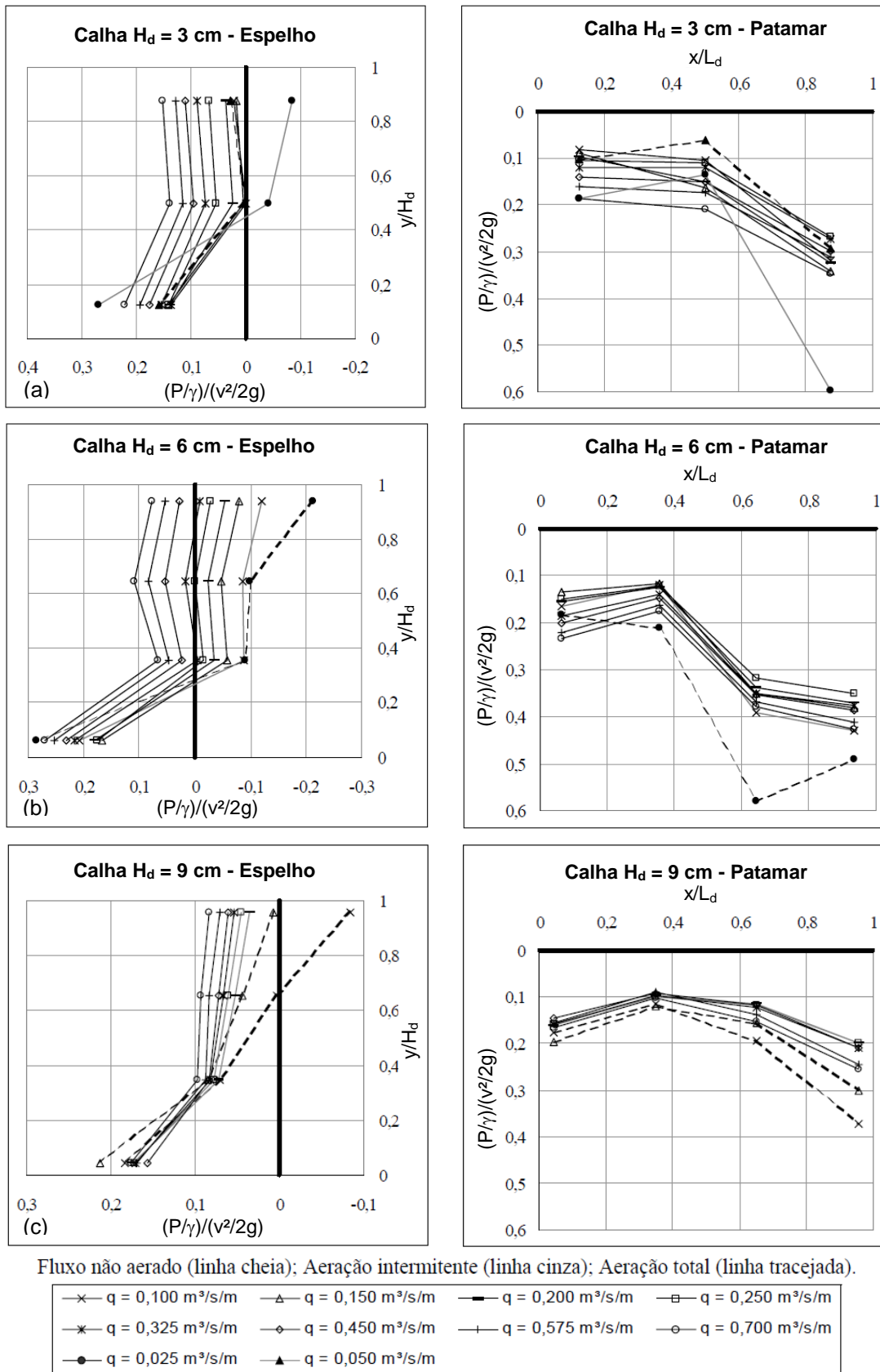


Figura 8 - Distribuição de pressões médias nas faces do espelho e patamar de um degrau de um vertedouro (a) degrau de 3 cm (b) degrau de 6 cm (c) degrau de 9 cm. Fonte: adaptado de Dai Prá (2004).

Gomes (2006) caracterizou os campos de flutuação de pressão e pressões extremas atuantes em vertedouros com degraus de 9 cm de altura e declividade 1V:0,75H, distribuídas ao longo da calha e ajustou modelos teórico-experimentais para prever o comportamento das pressões no espelho e no patamar, onde adimensionalizou as pressões através da Equação 3 e a posição ao longo da calha através da Equação 4 proposta por Amador (2005).

$$s' = \frac{(L_i - L_a)}{d_i} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$s'$  = posição longitudinal (adimensional);

$L_i$  = posição ao longo da calha medida a partir da crista do vertedouro (m);

$L_a$  = posição do início da aeração medida a partir da crista do vertedouro (m);

$d_i$  = profundidade do escoamento no início da aeração.

Para o cálculo da profundidade do escoamento no início da aeração ( $d_i$ ) Gomes (2006) utilizou a Equação 5 proposta por Matos (1999).

$$\frac{d_i}{K} = 0,361 \cdot F^{*0,606} \quad \text{Equação 5}$$

Os coeficientes de pressões médias e extremas nos espelhos obtidos por Gomes (2006) e os modelos teórico-experimentais são mostrados na Figura 9 e na Figura 10, sendo que  $h_c$  é a altura crítica e  $h_d$  é a altura do degrau.

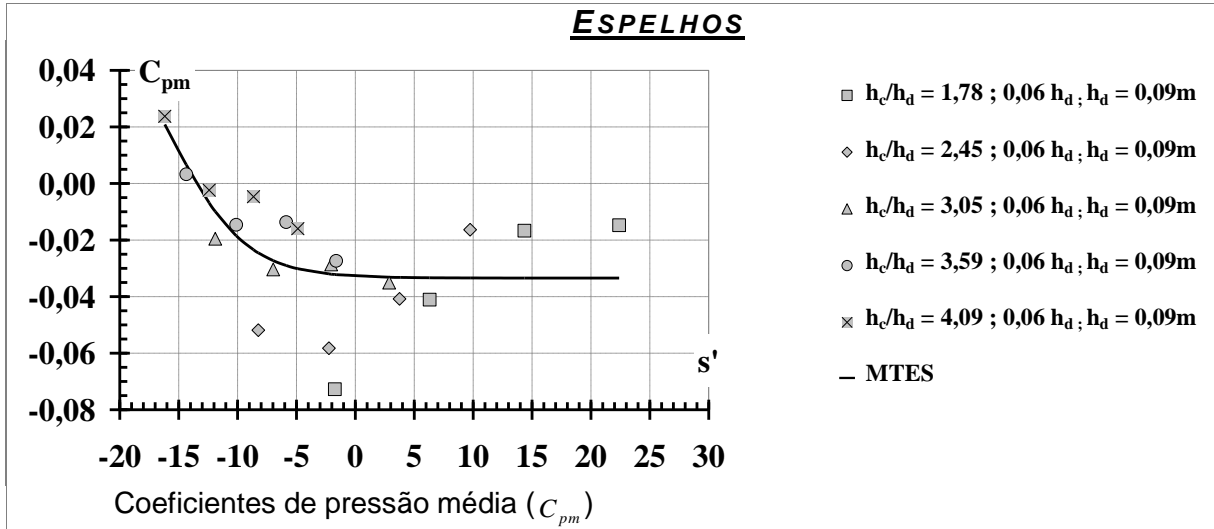


Figura 9 – Coeficiente de pressão média ( $C_{pm}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o espelho a uma distância  $0,06h_d$  da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006).

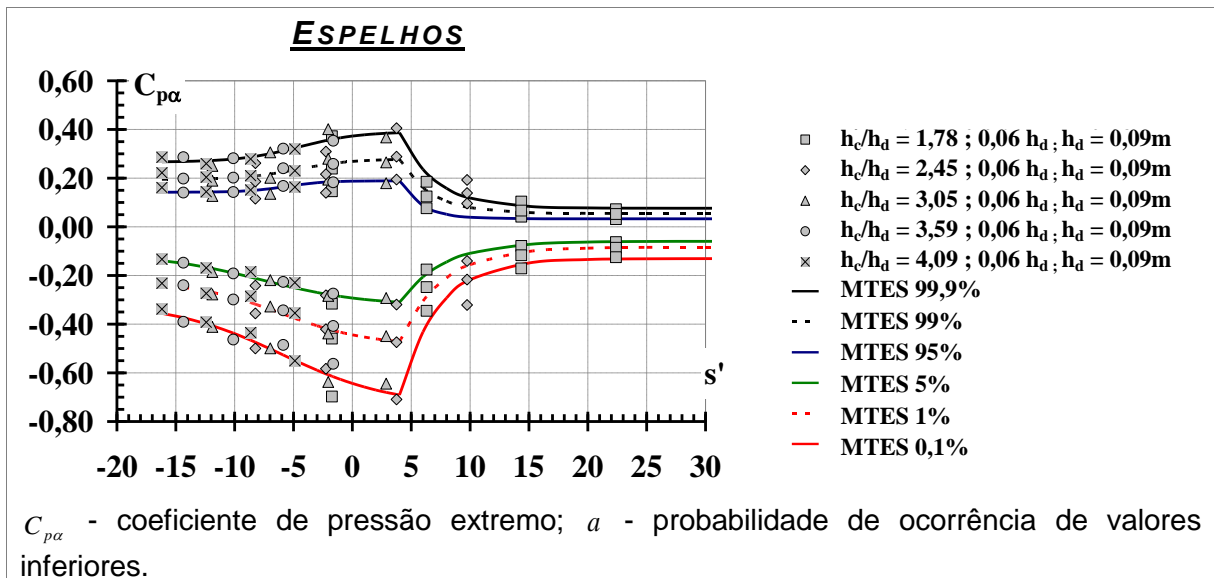


Figura 10 – Coeficiente de pressão extremo ( $C_{pa}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o espelho a uma distância  $0,06h_d$  da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006).

Os coeficientes de pressões médias e extremas nos patamares obtidos por Gomes (2006) e os modelos teóricos-experimentais são mostrados na Figura 11 e na Figura 12, sendo que  $h_c$  é a altura crítica e  $h_d$  é a altura do degrau.



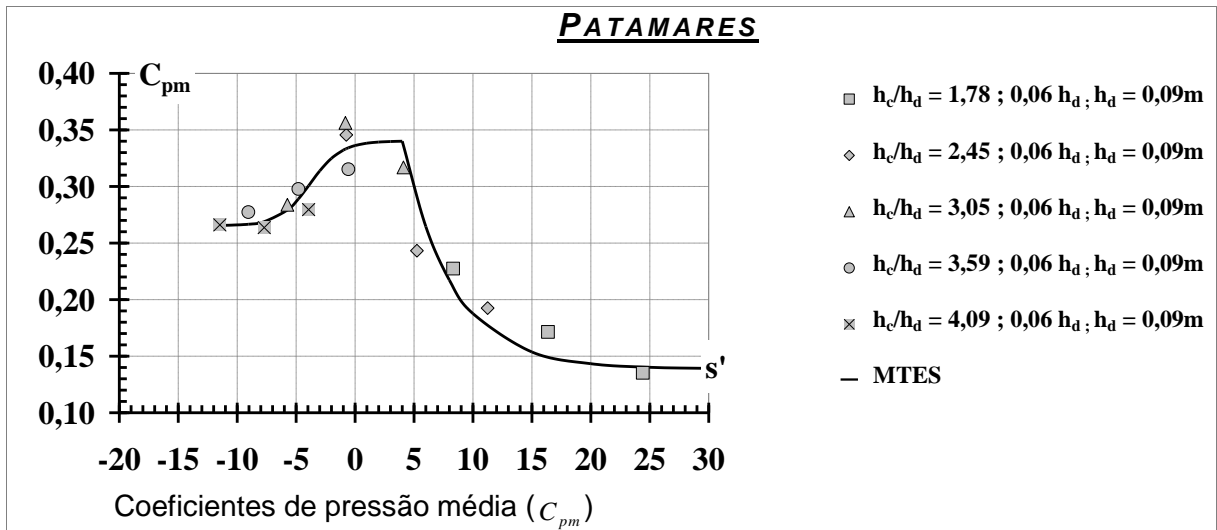


Figura 11 - Coeficiente de pressão média ( $C_{pm}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o patamar a uma distância  $0,06h_d$  da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006).

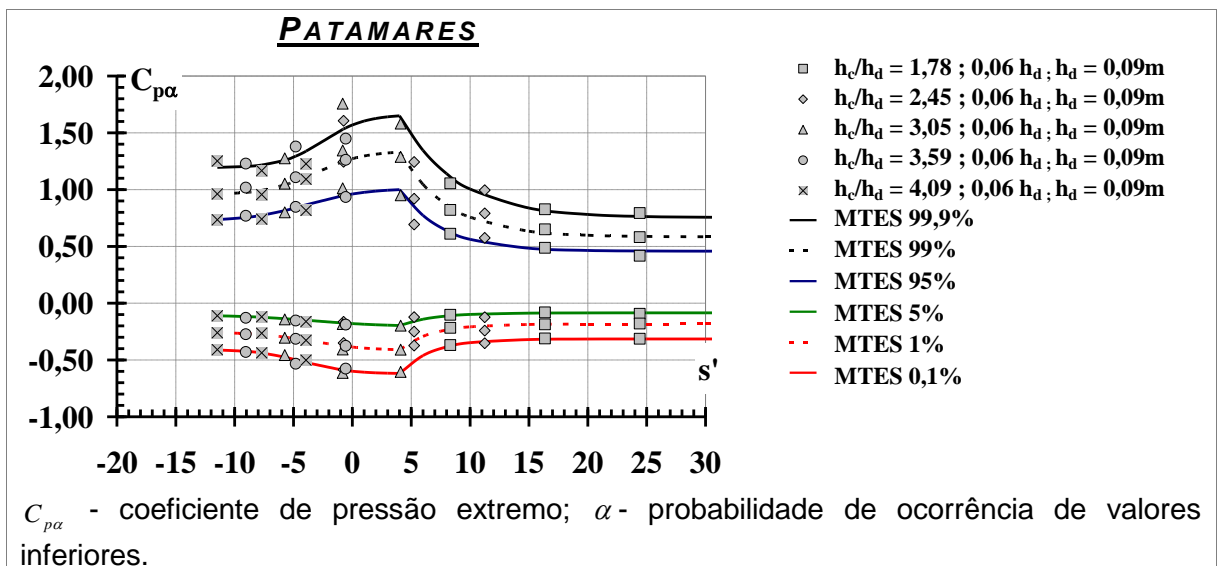


Figura 12 - Coeficiente de pressão extrema ( $C_{pa}$ ) e modelos teórico-experimentais (MTES) para o patamar a uma distância  $0,06h_d$  da quina. Fonte: adaptado de Gomes (2006).

Osmar et al. (2018) caracterizou os esforços atuantes em vertedouros em degraus através da análise adimensional por diferentes autores na caracterização da distribuição longitudinal das pressões médias e extremas atuantes ao longo da calha. Os autores identificaram, para o espelho, uma convergência dos seus resultados com os de Amador (2005) na maioria dos pontos e, para os resultados de Gomes (2006), os valores coincidiram próximo ao ponto de início de aeração. Já para os patamares, os valores do coeficiente de pressão extrema com 99,9% de probabilidade de não excedência são maiores que os informados por Amador (2005) e, os valores do coeficiente de pressão extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência são compatíveis com Amador (2005) e com o modelo teórico-

experimental proposto por Gomes (2006) para o adimensional de posição  $s'$  inferior a 10. Os autores atribuíram que as diferenças verificadas nos resultados são devido as posições de instalação dos transdutores entre os diferentes modelos experimentais e, também a possíveis erros de cálculo da profundidade do escoamento em cada seção ao utilizar o adimensional de coeficiente de pressão representado na Equação 3.

## 2.5 Cavitação em vertedouros

A cavitação é um fenômeno dinâmico mais comum de ocorrer em escoamentos de líquidos com altas velocidades (Arndt, 1981). Consiste na formação e subsequente colapso de cavidades de vapor que se formam em consequência de uma redução da pressão local abaixo da pressão de vapor. O colapso é muito rápido e ocasiona ondas de choques de alta pressão, as quais provocam danos às superfícies (Falvey, 1990).

A região propensa ao risco de cavitação em vertedouros em degraus é a região não aerada do escoamento, sendo que a área mais vulnerável é entorno da posição de início de aeração, uma vez que o processo de aeração não está totalmente desenvolvido e a velocidade é maior do que a montante.

Um método de avaliar o potencial de cavitação em vertedouros em degraus é através de medições de pressões hidrodinâmicas. Lopardo (1996), comparando dados de pressões entre protótipo e modelo de Froude, recomenda o uso das pressões extremas mínimas com probabilidade de 0,1% de não excedência para identificar processos de incipiência à cavitação.

O início da cavitação pode ser determinado através do índice de cavitação (Equação 6) derivado da equação de Bernoulli:

$$\sigma = \frac{P + P_{atm} - P_v}{\rho v^2 / 2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

$\sigma$  = índice de cavitação;

$P$  = pressão local;

$P_{atm}$  = pressão atmosférica;

$P_v$  = pressão de vapor da água;

$v$  = velocidade média do escoamento.

Terrier (2016) considerou que o início da cavitação começa quando o índice de cavitação ( $\sigma$ ) for menor que o índice de cavitação crítico ( $\sigma_c$ ), sendo que  $\sigma_c = 0,2$ , obtido a partir de diversos estudos e apresentados por Falvey (1990), para vertedouros de calha lisa.

Matos, Quintela e Ramos (2000) propuseram um modelo teórico-experimental para estimar a ocorrência de cavitação na seção de afloramento da camada limite, a partir de dados experimentais de um vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H e degraus com altura de 0,60 m. Segundo os autores, a ocorrência de cavitação iniciará quando o valor crítico estimado pela equação for superior ao índice de cavitação obtido pelas Equação 7 e Equação 8 (Gomes, 2006). Para calhas com degraus compreendidos entre 0,30 e 1,20 m, este valor estaria compreendido entre 20 m<sup>2</sup>/s a 30 m<sup>2</sup>/s.

$$\sigma_i = 0,094 \cdot \text{tg} \alpha^{-1} \cdot F^{*-0,182} \left[ 1 + \frac{\frac{2,77}{K} \cdot \left( \frac{P_{atm} - t_v}{\gamma} \right)}{\cos \alpha \cdot F^{*0,606}} \right] \quad \text{Equação 7}$$

$$\sigma_{cri} = 4 \cdot f_{eq} = \frac{4}{[1,696 + 0,691 \cdot \log(F^*)]^2} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$t_v$  = tensão relativa de vapor da água (N/m<sup>2</sup>);

$f_{eq}$  = fator de resistência ao escoamento de Darcy-Weisbach;

Para Amador (2005) a zona crítica para a ocorrência de cavitação em vertedouros em degraus está localizada entre a crista e o ponto de início de aeração. O autor sugere, ainda, que para vertedouros em degraus com declividade de 1,0V:0,8H a incipiência a cavitação poderá ocorrer para vazões específicas superiores a 11,5 m<sup>2</sup>/s e 14 m<sup>2</sup>/s, para alturas de degraus de 0,6 m e 1,2 m, respectivamente, baseado nos modelos de previsão de pressões com 0,1% de probabilidade de ocorrência, sugerido por Lopardo (1996).

Uma abordagem semelhante foi adotada por Gomes (2006), onde o mesmo selecionou os modelos teóricos-experimentais dos coeficientes de pressões com 0,1% de probabilidade de ocorrência de valores inferiores para a determinação de limites de incipiência à cavitação. As vazões específicas críticas que levariam à ocorrência de cavitação são na ordem de 11,3 a 15,6 m<sup>2</sup>/s e velocidade média crítica de 17,5 m/s (Gomes, 2006; Gomes, Marques e Matos, 2007).

A partir de resultados experimentais, Pfister, Hager e Minor (2006b), consideraram que cada degrau é uma irregularidade de fundo singular com risco de cavitação, e que o índice de cavitação crítico está na ordem de  $\sigma_c \approx 1.0 (\pm 0,1)$  e as pressões mínimas medidas ao longo da parte superior do espelho são negativas. Com base nisso, os autores apresentaram que o índice de cavitação no primeiro degrau está abaixo do valor crítico de 0,9 para vazões específicas maiores que 30 m<sup>2</sup>/s e protótipos com degraus de 1,2 m de altura.

Frizell, Renna e Matos (2013) utilizaram uma câmara de baixa pressão ambiente para induzir a cavitação. Foram ensaiadas duas configurações com calha de ângulos de 21,8° e 68,2°, para vazões específicas entre 0,418 a 1,255 m<sup>2</sup>/s. Um índice de cavitação crítico  $\sigma_c = 0,60 - 0,65$  foi obtido para com inclinação de 68,2° e  $\sigma_c = 0,30 - 0,40$  para com inclinação de 21,8°. Estes valores não indicam o início da cavitação, mas o ponto a partir do qual é observado um grande aumento na atividade de cavitação.

A partir desses estudos os autores verificaram que os vertedouros em degraus estão sujeitos a danos de cavitação, estando limitados a uma faixa de vazão. Desta forma é importante prever maneiras de prevenção a esses danos e, uma das formas, é aumentar a concentração de ar ao escoamento, através da aeração induzida.

## **2.6 Aeração induzida**

A introdução de ar em uma corrente líquida torna o meio ar-água compressível e elástico, capaz de absorver os impactos de ondas de pressão que se formam em consequência do colapso das bolhas de cavitação, eliminando ou reduzindo de forma significativa a erosão por cavitação (Quintela e Ramos, 1980).

Em escoamento com superfície livre, a introdução de ar pode ocorrer naturalmente, por meio da superfície livre, ou através de dispositivos de aeração.

A aeração por meio da superfície livre ocorre com frequência e fornece ar ao escoamento quando a espessura da camada limite atinge a profundidade do escoamento. Porém, em um vertedouro de calha lisa uma pequena porcentagem de ar arrastado através da superfície livre atinge os limites sólidos da estrutura, não sendo suficiente para evitar a erosão devido à cavitação (Kokpinar e Gogus, 2002).

Matos (1990) também salienta que a incorporação de ar através da superfície livre de um escoamento e a consequente proteção contra erosão por cavitação são, em geral, limitadas as baixas vazões específicas, pois para vazões específicas elevadas, o vertedouro não dispõe de ar livre suficiente.

Uma solução técnica mais eficiente para controlar os danos causados por erosão e/ou cavitação em vertedouros com altas velocidades de escoamento e baixas pressões é a utilização da aeração induzida, fazendo com que o ar seja introduzido no escoamento.

A aeração induzida pode ser obtida por meio de aeradores, os quais podem ser: um dispositivo localizado na soleira que provoque uma descontinuidade no escoamento, permitindo a entrada de ar, e um sistema que permita o transporte de ar do exterior para o escoamento (Matos, 1990).

Volkart e Rutschmann (1984) citam alguns tipos de dispositivos de aeração de fundo, os quais provocam descontinuidade no escoamento, que são: ranhuras, defletores e degraus. O objetivo destes dispositivos é produzir uma queda de pressão local para que o ar seja succionado para o interior do escoamento e, com o aumento da compressibilidade da mistura ar-água, a superfície de concreto é protegida dos danos causados pela cavitação, em virtude, da absorção do impacto do colapso das bolhas de vapor.

### **2.6.1 Aeradores em vertedouros de calha lisa**

A primeira instalação conhecida de aeradores em vertedouro foi na Barragem Bureau's Yellowtail após altas vazões verterem, em 1967, sobre o vertedouro e causarem erosão por cavitação no seu túnel (Borden et al., 1971).

Falvey (1990) relata o uso de aeradores em vertedouros com calhas lisas, utilizados como soluções para problemas de erosão nas estruturas causadas pela cavitação. Um dos casos relatados é da Barragem de Blue Mesa, onde se verificou, ao realizar uma inspeção depois de um período de funcionamento do vertedouro,

uma área com dano de cavitação. Para solucionar o problema, um aerador foi projetado e construído no túnel do vertedouro, o qual consistiu de uma rampa, uma ranhura a jusante e um degrau com deslocamento cônico concêntrico, para evitar que o sulco de arejamento se encha com água. Após a implantação dos aeradores não se verificou problemas de danos por cavitação na estrutura.

Outro caso relatado por Falvey (1990) foi o túnel do vertedouro Arizona da barragem de Hoover, que sofreu graves danos durante um período de operação, onde durante uma inspeção foi observado um orifício de 35 m de comprimento, 9 m de largura e 13,7 m de profundidade. Conforme Terrier (2016), as altas velocidades, a montante da área danificada, levaram à separação do escoamento e à cavitação. Com isso, para reduzir a sub pressão, Bradley (1945) apud Terrier (2016) investigou vários dispositivos (Figura 13) para introduzir ar no escoamento e concluiu que uma quantidade limitada de ar poderia ser injetada, sendo que o defletor 3 (Figura 13) produziu melhores resultados.

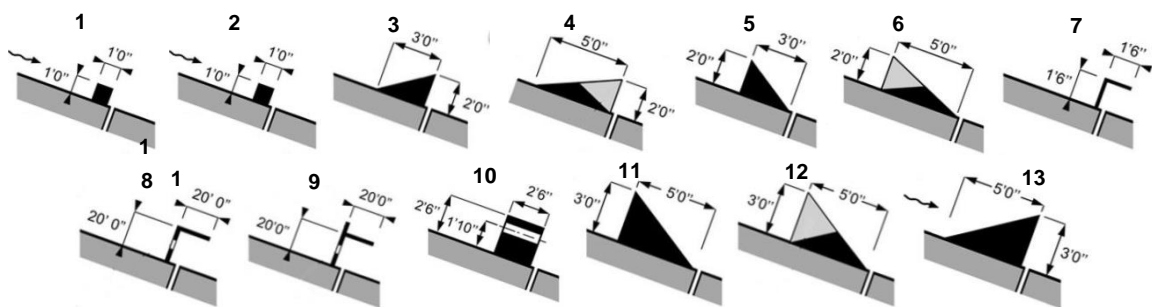


Figura 13 - Aeradores testados por Bradley (1945) (dimensões em polegadas). Fonte: adaptado de Terrier (2016)

De acordo com Volkart e Rutschmann (1984), o processo de incorporação do ar em uma calha lisa através de um dispositivo de aeração é caracterizado conforme a Figura 14, pelas zonas de aproximação, de transição, de aeração e de desaeração. A zona de aeração inicia quando o escoamento passa sobre o defletor e pode ser dividida em: zona de cisalhamento, zona de spray e zona de mistura. Na zona de cisalhamento, o ar é succionado para a cavidade formada pelo lançamento do escoamento onde, devido à instabilidade da parte inferior do escoamento, ocorre a incorporação de ar, iniciando a zona de spray. Na zona de mistura, quando o jato d'água lançado pelo defletor impacta o fundo da calha, pode haver a incorporação adicional de ar, sendo que a concentração de ar e a pressão próxima ao fundo da calha atingem o valor máximo no ponto de impacto do jato. No entanto, a jusante, na

zona de desaeração, a concentração de ar próxima ao fundo da calha diminui à medida que as bolhas de ar sobem para a superfície do escoamento.

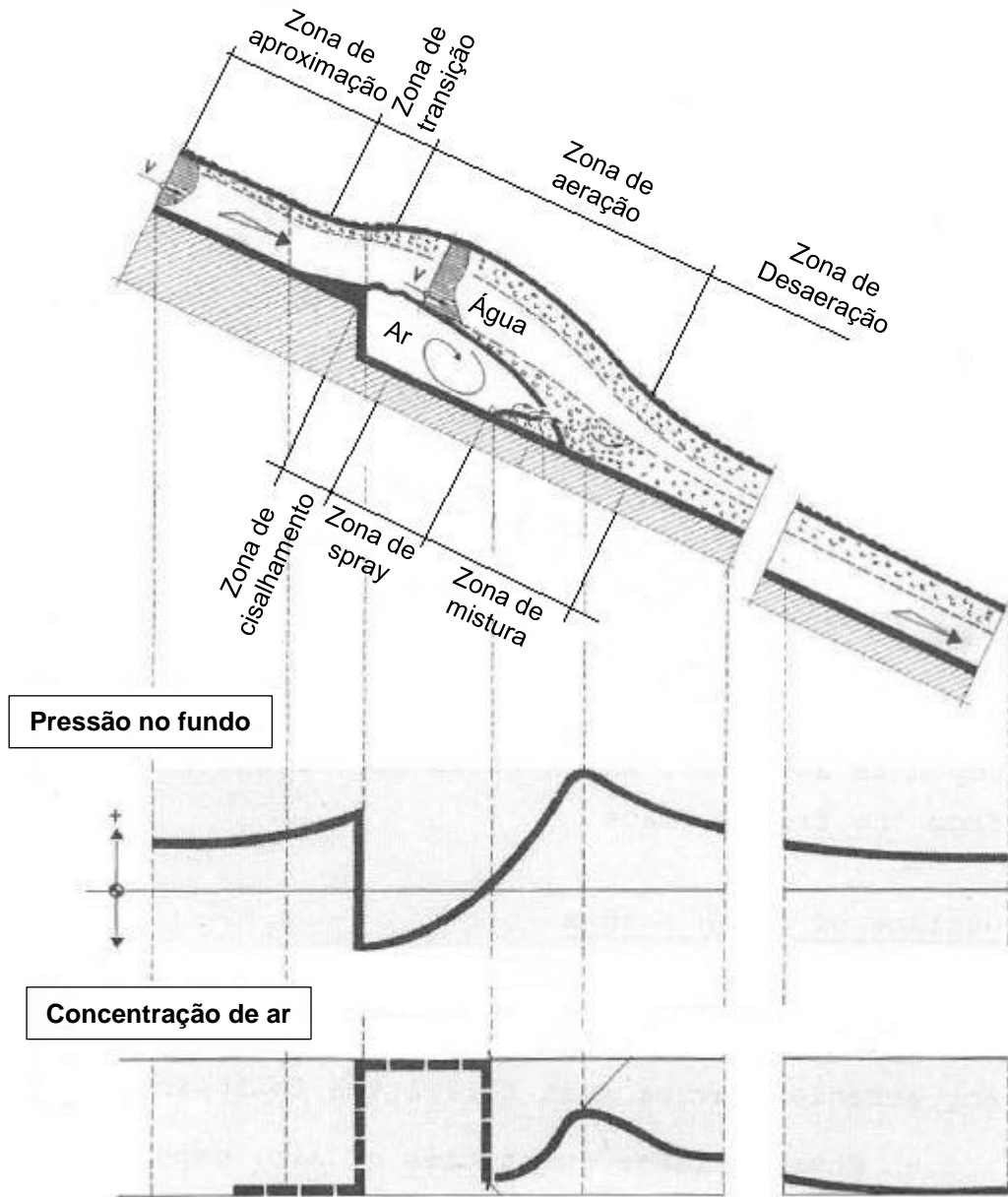


Figura 14 - Processo de entrada de ar através de um aerador do tipo defletor. Fonte: adaptado de Volkart e Rutschmann (1984).

O processo de entrada de ar para as outras formas de dispositivos de aerção, como degraus e ranhuras, seguem os mesmos princípios mostrados na Figura 14, no entanto, possuem zonas com dimensões diferentes.

Para Volkart e Rutschmann (1984), a escolha do tipo de aerador torna-se restrito, quando se leva em conta a praticidade, a economia e a entrada de elevadas

quantidades de ar. Os autores estudaram diferentes geometrias de aeradores: defletores, ranhuras e degraus, podendo ser utilizados individualmente ou combinações dos mesmos (Figura 15), nas soleiras ou nas paredes laterais.

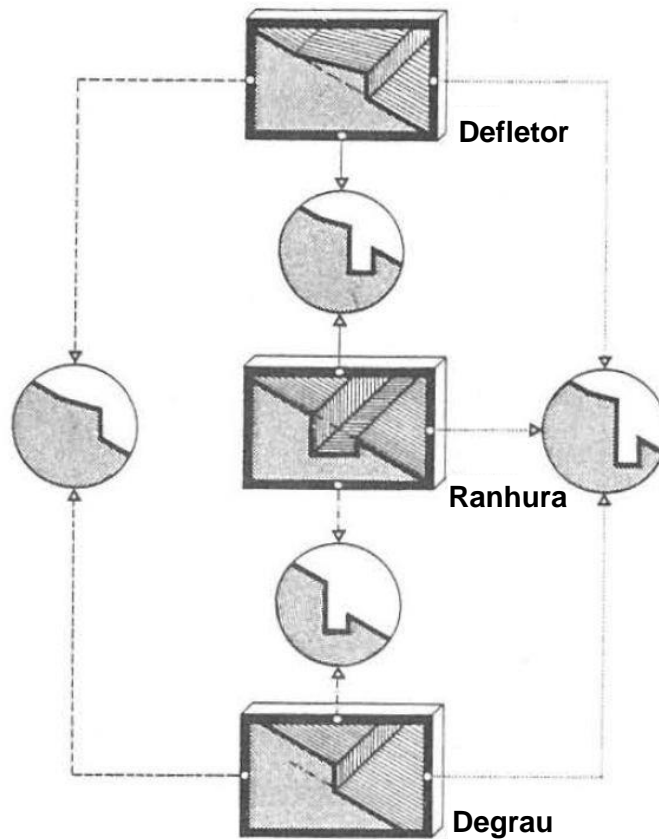


Figura 15 - Principais dispositivos de aerção e suas combinações. Fonte: adaptado de Volkart e Rutschmann (1994)

Os defletores foram inicialmente utilizados como medida corretiva em vertedouros, apresentando vantagens em relação às dimensões consideráveis do jato formado para pequenas alturas de defletores, e também, devido ao aumento das velocidades na camada limite em consequência do efeito do salto esqui, resultando em um aumento da intensidade de aerção (Volkart e Rutschmann, 1984). Os autores também apresentam algumas desvantagens como a reduzida faixa de vazões para os quais se obtêm níveis de aerção eficientes, necessitando da combinação com outro tipo de dispositivo de aerção.

Os degraus apresentam como vantagens a reduzida criação de ondas de choque e a significativa entrada de ar no escoamento, que se dá devido à trajetória do jato ser maior, o qual introduz maior quantidade de ar, conforme Volkart e Rutschmann (1984). Porém, para baixas vazões a introdução de ar no escoamento é



menor, fazendo com que seu uso combinado com defletor, garanta uma aeração mais eficiente.

As ranhuras são geralmente utilizadas em galerias ou a jusante de comportas e apresentam a vantagem de facilitar o fornecimento de ar para o escoamento, que pode provir de aberturas de ar, como condutos, ou a partir do espaço livre resultante da disposição das ranhuras nas paredes laterais (Volkart e Rutschmann, 1984). A principal desvantagem deste tipo de dispositivo é a reduzida aeração, em virtude do pequeno comprimento da interface ar-água (Matos, 1990).

De acordo com Volkart (1983) os melhores desempenhos foram obtidos com defletor e a combinação de defletor e degrau. Para Matos (1990), a combinação de um defletor, um degrau e uma ranhura conduz, de forma geral, a uma solução eficiente, considerando somente à eficiência ao arejamento.

A aeração de um vertedouro também pode ser realizada através de dispositivos de fornecimento de ar, que podem ser através da criação de descontinuidades nas paredes laterais, formando um espaço vazio entre o escoamento e a parede do vertedouro, ou da execução de condutos que transportam ar para o interior do escoamento (Volkart e Rutschmann, 1984).

Falvey (1990) cita alguns tipos de dispositivos utilizados para fornecer ar da atmosfera para o interior do escoamento, como se pode visualizar na Figura 16. As rampas ou defletores, os degraus nas paredes laterais e os pilares não são utilizados para fornecer aeração em vertedouros com calhas largas, pois requerem grandes deslocamentos, que são inviáveis do ponto de vista estrutural e construtivo. Já as ranhuras são muitas vezes utilizadas como solução de estruturas já existentes, porém se a área da seção transversal da ranhura for pequena será insuficiente para proteger a calha do vertedouro contra a erosão por cavitação.

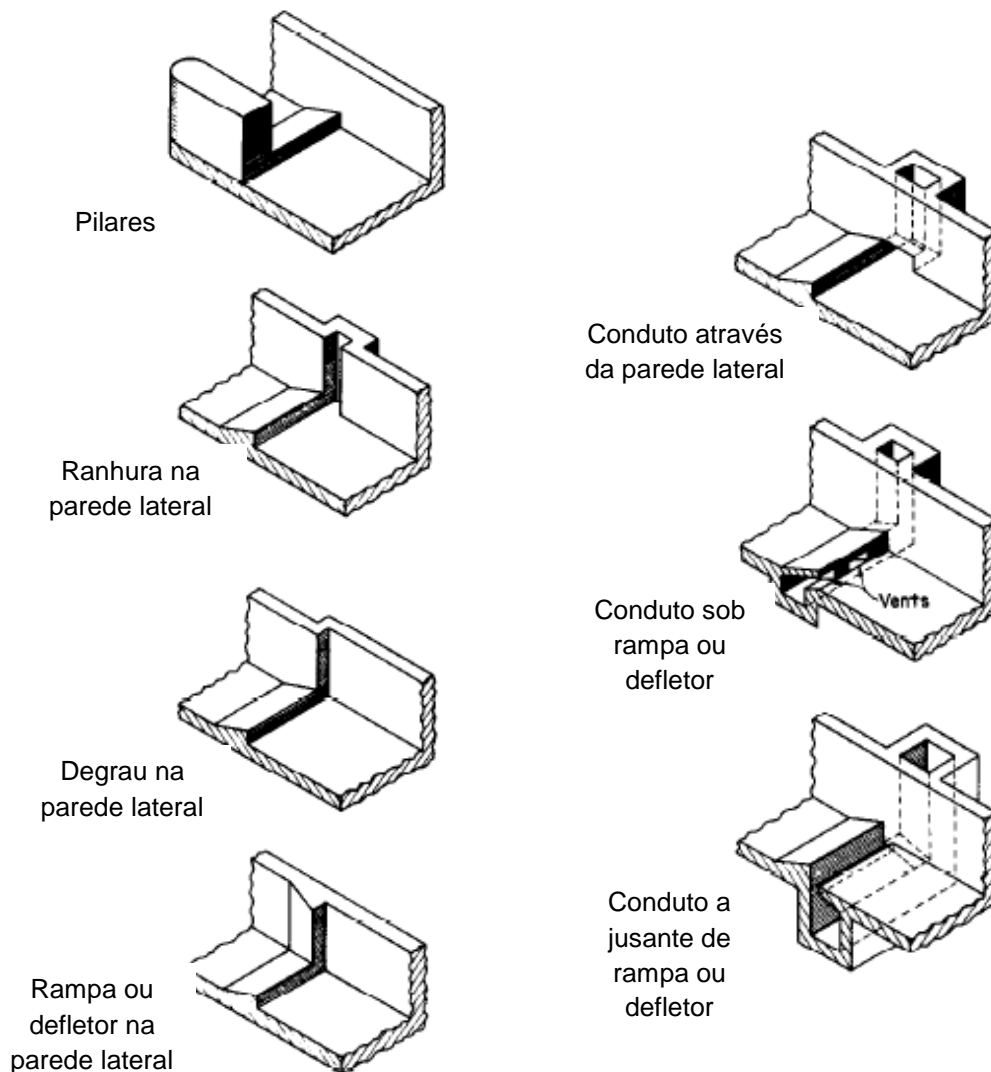


Figura 16 - Representação de sistemas de fornecimento de ar (a) fornecimento de ar com defletor lateral, (b) fornecimento de ar com degrau lateral, (c) fornecimento de ar por pilar, (d) fornecimento de ar por ranhuras laterais, (e) fornecimento de ar por condutos especiais abaixo do escoamento e (f) sistema de aeração especial. Fonte: adaptado de Falvey (1990)

O dispositivo que fornece ar abaixo do escoamento por condutos localizados nas laterais do vertedouro, combinado com um aerador de fundo, impõe um deslocamento da massa de água que escoam sobre o vertedouro e faz com que a mesma seja lançada para cima, permitindo a formação de um salto e uma cavidade com ar junto ao fundo da calha (Brito, 2011). O deslocamento da massa de água produz uma subpressão de modo que o ar é succionado para o interior do escoamento (Brito, 2010), através do conduto presente na lateral do vertedouro. Estes tipos de dispositivos são utilizados em vertedouros com calha largas (Favey, 1990).

Kokpinar e Gogus (2002) investigaram as características do jato de água e do ar incorporado pelo escoamento sobre um dispositivo de aeração tipo rampa e degrau instalado em vertedouros com calha lisa, através de dados experimentais obtidos em modelo (Figura 17). Uma tubulação foi instalada no degrau para manter a continuidade da entrada de ar.

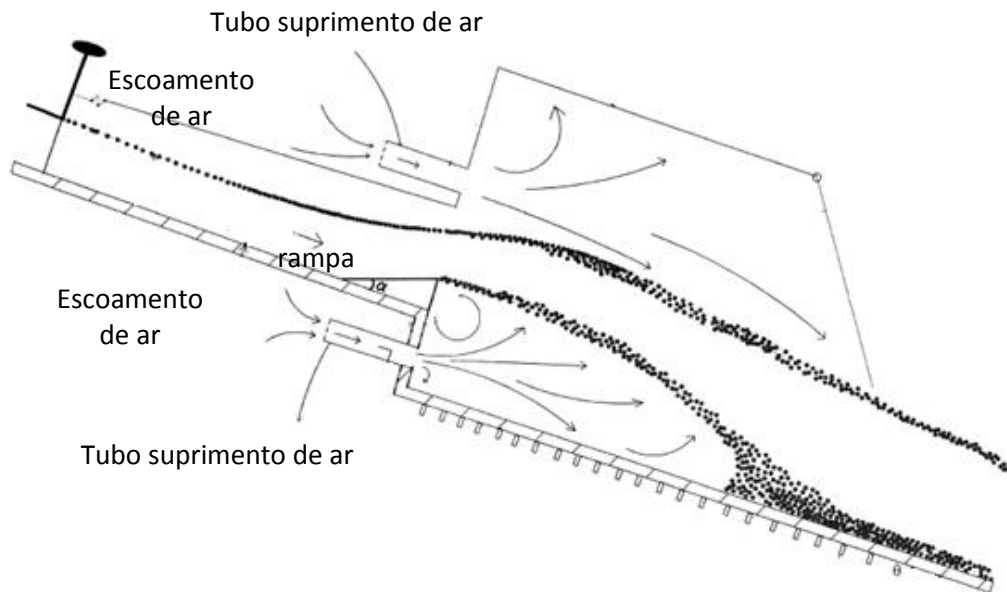


Figura 17 - Esboço do dispositivo de aeração utilizado nos experimentos de Kokpinar e Gogus (2002).  
Fonte: adaptado de Kokpinar e Gogus (2002).

Os autores estudaram o efeito do aerador, o qual fornece ar através de uma tubulação, bem como, a influência de três rampas com diferentes alturas, mantendo o ângulo de  $5,71^\circ$ , no escoamento sobre o canal. Concluíram que a utilização da combinação de uma rampa e um aerador resulta em maiores taxas de aeração no escoamento, quando comparado à utilização apenas do aerador. Ainda perceberam que devido a capacidade reduzida de aeração, ocorrem maiores flutuações de pressão em torno da região de impacto do jato de água.

Bahena et al. (2018) investigou o efeito combinado de um pilar e um aerador de fundo com tubos laterais, na concentração de ar, em um modelo físico de vertedouro de calha lisa na escala 1:21 (Figura 18). Para a comparação, o autor utilizou ensaios experimentais no vertedouro de calha lisa sem pilar, apenas com o aerador de fundo.

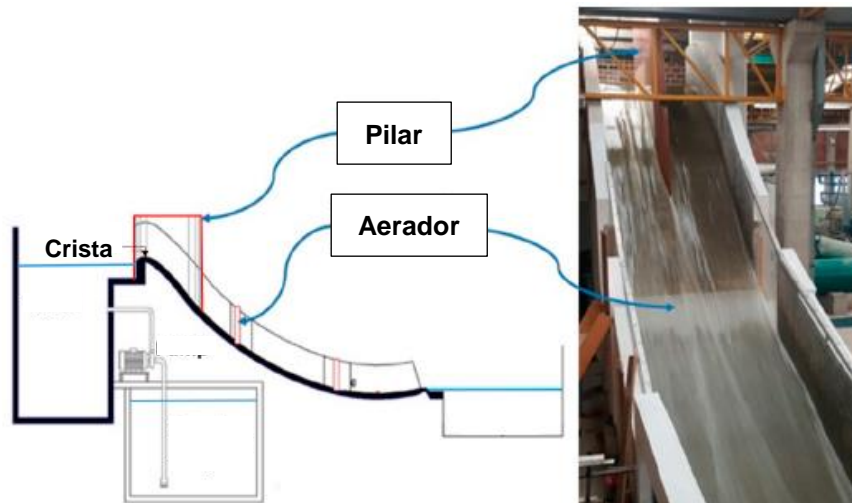


Figura 18 – Modelo físico utilizado no estudo de Bahena et al. (2018). Fonte: adaptado de Bahena et al. (2018).

Os resultados dos autores mostram que a concentração de ar no fundo aumenta com a implementação dos pilares na crista da ogiva, no entanto, a distribuição da concentração de ar no fundo do vertedouro ao longo da largura e comprimento da calha não é uniforme, porém tem capacidade de reduzir o risco de danos por cavitação e melhorar a segurança da estrutura.

### 2.6.2 Aeradores em vertedouros em degraus

O estudo sobre aeração induzida em vertedouro em degraus é importante para que seja possível aumentar a faixa operacional destas estruturas sem riscos de danos por erosão e/ou cavitação nos degraus. Porém, há poucos estudos na literatura sobre a utilização de aeradores em vertedouros em degraus.

Pfister, Hager e Minor (2006a) investigaram a concentração de ar em um vertedouro em degraus a partir de dois diferentes tipos de defletores com fornecimento de ar pelas paredes laterais. Os defletores foram instalados entre o final da ogiva do vertedouro e o primeiro degrau, conforme Figura 19, onde ambos defletores possuem uma inclinação de 1:7 e comprimento de  $0,6h_d$ . O vertedouro possui degraus com altura  $h_d = 0,093$  m, a declividade da calha é de  $50^\circ$ , a ogiva foi projetada para uma vazão específica de  $0,863$  m<sup>2</sup>/s e a vazão específica variou entre  $0,11$  a  $0,86$  m<sup>2</sup>/s.

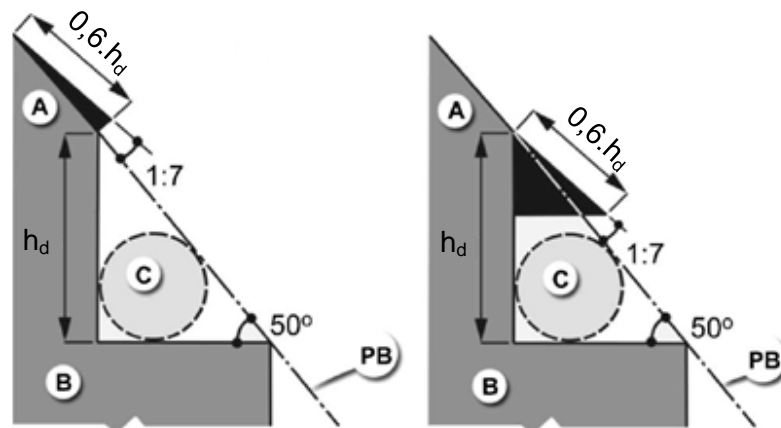


Figura 19 - Posição dos dois tipos de defletores utilizados no estudo (A) defletor, (B) primeiro degrau, (C) fornecimento de ar e (PB) Pseudo-fundo. Fonte: adaptado de Pfister, Hager e Minor (2006a).

Os autores constataram que imediatamente a jusante do aerador é introduzida uma grande quantidade de ar, seguido por uma região com pequena entrada de ar. Desta forma, a concentração de ar junto à parte inferior do escoamento aumenta até um valor de equilíbrio, que depende da altura e da declividade da calha. Esta concentração de ar inferior foi dividida em quatro regiões, as quais foram descritas em termos de parâmetros hidráulicos, conforme a Figura 20 e a Tabela 1, permitindo a predição de concentração de ar ao longo da parte inferior da calha.

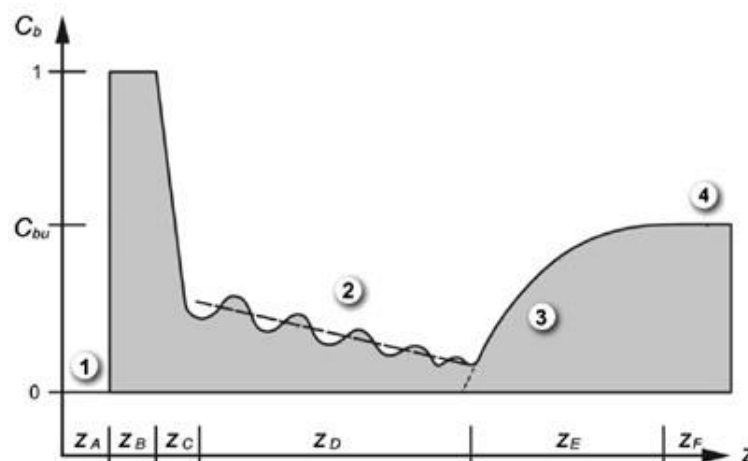


Figura 20 - Concentração de ar ( $C_b$ ) junto à parte inferior da calha, indicando as quatro regiões. Fonte: Pfister, Hager e Minor. (2006a).

Na região 1 não há presença de ar incorporado no escoamento até a borda do defletor ( $Z_A$ ). Em seguida, devido ao defletor, o escoamento é lançado do fundo e uma cavidade de ar é formada até o jato atingir o pseudofundo ( $Z_B$ ).

A região 2 é uma região de transição, onde ocorre um rápido desprendimento de ar que está associado ao impacto do jato no degrau ( $Z_C$ ), seguido de uma diminuição lenta da concentração de ar ( $Z_D$ ).

Na região 3, a posição de início da aeração é atingida e o ar da superfície é incorporado no escoamento ( $Z_E$ ) e, quando o escoamento é uniforme, ou seja, quando a concentração de ar inferior uniforme ( $C_{bu}$ ) é atingida ( $Z_F$ ), temos a região 4.

Tabela 1 – Equações para predição de concentração de ar ao longo da parte inferior da calha.

Região 1	$z_B/h_c = 0,16 \cdot (h_c/z_A)^{-2}$	para $0,2 < h_c/z_A < 1$
Região 2	$C_{bm} \frac{h_c}{h_d} = 0,1 \cdot 10^{-0,035 \cdot n}$	para $n \geq 0$
Região 3	$\frac{z_D}{s} = 1,5 \left( \frac{h_c}{h_d} \right)^2$	para $1 < \left( \frac{h_c}{s} \right) < 3$
Região 4	$C_b/C_{bu} = \tanh \left[ 0,22 \left( \frac{z_3}{h_d} \right) \right]$	para $z_3 \geq 0$
	$C_{bu} = 0,268 - 5,69 \cdot 10^{-3} F^*$	para $\phi = 50^\circ$

Pfister, Hager e Minor (2006a) concluíram que o escoamento sofre maiores influências nas regiões 1 e 2. Com isso, para maiores vazões específicas, o ponto de aeração irá se deslocar mais para jusante e, conseqüentemente, aumentar o risco de cavitação, em virtude da ausência de ar próximo a área junto ao fundo da calha do vertedouro em degraus. Para baixas vazões, a pulverização do jato ocorrida pode se tornar um problema para estruturas hidráulicas adjacentes e também pode haver formação de gelo em regiões frias.

Com isso, para reduzir dano de cavitação até a posição de aeração para altas vazões, Pfister, Hager e Minor (2006b) propuseram um aerador de fundo, inserido na parte inferior do primeiro degrau para arejar a parte inferior da calha. O aerador de fundo consiste em um lábio que se prolonga através da calha, com uma parte horizontal próxima a face do espelho do degrau, e uma parte inclinada próxima e com ângulo igual ao pseudofundo (Figura 21).

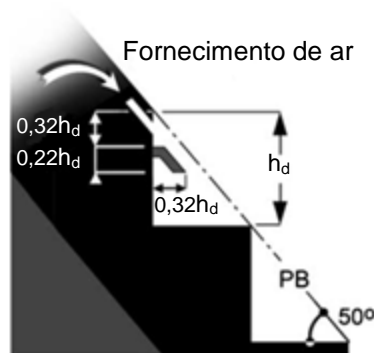


Figura 21 – Detalhe da geometria do aerador estudado por Pfister, Hager e Minor (2006b) (PB) pseudofundo. Fonte: adaptado de Pfister, Hager e Minor (2006b).

Para reduzir a pulverização relacionada ao impacto do jato nos degraus do vertedouro com defletor para baixas vazões, o ângulo de impacto do jato foi reduzido, alterando a geometria nas quinas dos degraus da calha do vertedouro, ou seja, a quina foi cortada com ângulo próximo ao ângulo de impacto do jato.

Na sua pesquisa as características hidráulicas do escoamento foram analisadas em termos de concentração máxima de ar e da distribuição da concentração de ar junto ao fundo e a dissipação de energia ao longo da calha. O modelo utilizado foi o mesmo utilizado por Pfister, Hager e Minor (2006a) e foram ensaiadas três vazões: a vazão inferior é a menor vazão a partir da qual não há formação de pulverização no escoamento e a maior vazão é a vazão máxima em que o ar presente no aerador ainda é arrastado pelo escoamento. Na Figura 22 (a) e (b) apresentam o escoamento sem e com aerador de fundo, respectivamente, para as três vazões ensaiadas pelos autores.

O aerador adiciona uma pequena quantidade de ar no escoamento, porém suficiente para melhoria do desempenho do vertedouro para vazões maiores e, também, com a modificação dos degraus da calha do vertedouro houve uma redução da pulverização do escoamento ao longo da calha. No entanto, a pré-aeração não representou efeitos significantes na dissipação de energia ao longo da calha.

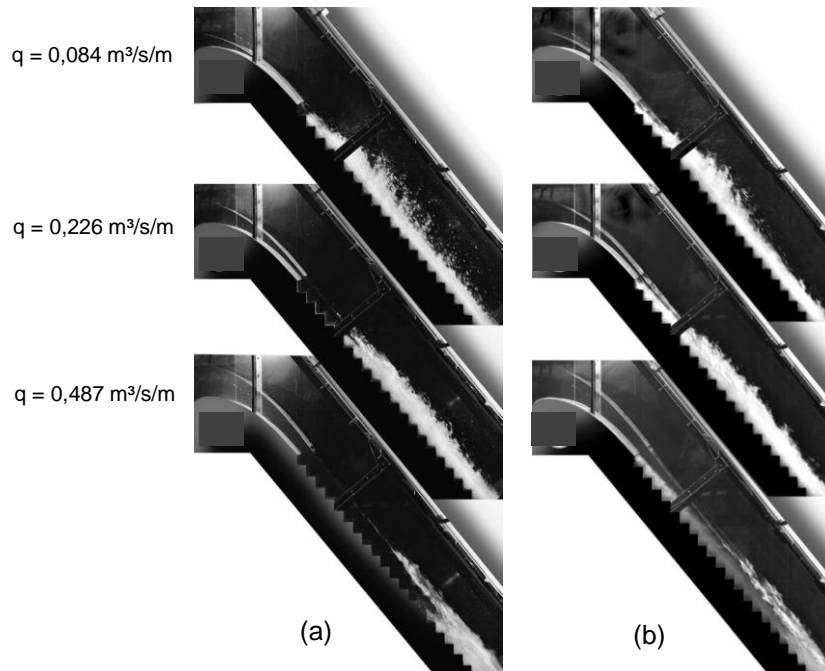


Figura 22 – (a) Escoamento sem aerador de fundo e (b) Escoamento com aerador de fundo para três diferentes vazões ensaiadas por Pfister, Hager e Minor (2006b). Fonte: modificado de Pfister, Hager e Minor (2006b).

Zamora et al. (2008) ampliaram esta pesquisa e investigaram uma nova geometria de aerador, juntamente com um conduto conectado à atmosfera para fornecimento de ar (Figura 23), ambos instalados no primeiro degrau do vertedouro utilizado por Pfister, Hager e Minor (2006a,b) em seus estudos. O ângulo do aerador de fundo é o mesmo ângulo do pseudofundo ( $50^\circ$ ).

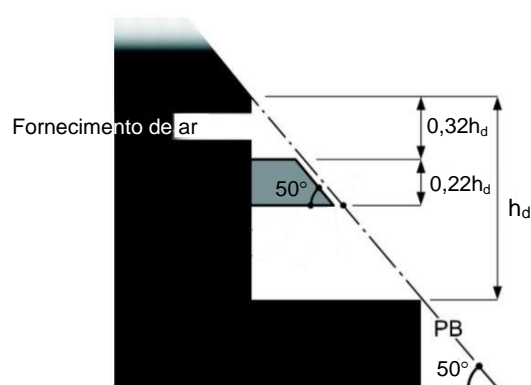


Figura 23 – Detalhe da geometria do aerador estudado por Zamora et al. (2008). Fonte: modificado de Zamora et al. (2008).

O aerador de fundo instalado no espelho do primeiro degrau faz com que a subpressão ocasionada abaixo do mesmo permita o fornecimento de ar no escoamento, diminuindo, assim, o risco de cavitação para as maiores vazões específicas. Zamora et al. (2009), também comenta que o efeito de um único



aerador é limitado, pois as bolhas arrastadas para o escoamento tendem a subir, em virtude da menor densidade do ar quando comparado com a água. Desta forma, a utilização de um segundo aerador pode ser necessária.

Buscando uma solução hidráulica para antecipar o ponto de início de aeração e a diminuir pressão sobre os degraus, e com isso, aumentar a vazão descarregada pelo vertedouro, sem riscos de cavitação, Mojtaba et al. (2015) investigaram o efeito do escoamento sobre um vertedouro em degraus com a instalação de quatro diferentes defletores, que permitem a introdução de ar no escoamento, utilizando dois modelos distintos, conforme características apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Características dos vertedouros em degraus utilizados no estudo de Mojtaba et al. 2015

Q (l/s)	Número de degraus	Largura do vertedouro (cm)	Largura do patamar (cm)	Altura do espelho (cm)	Inclinação da calha do vertedouro (°)	Modelo
220 240 270 290 310	84	75	7,2	6	40	1
126 137 155 166 178 192	64	72	4	4,8	50	2

Na Figura 24 é possível visualizar os quatro tipos de defletores, sendo que os defletores 1, 2 e 4 possuem seção triangular e o defletor 3 possui seção trapezoidal. O defletor 1 foi instalado no final da ogiva e antes do primeiro degrau, o defletor 2 foi instalado na parte superior do espelho do primeiro degrau e acima do pseudofundo, o defletor 3 foi instalado na parte superior do espelho e sob o pseudofundo e o defletor 4 foi instalado da mesma maneira que o defletor 1, porém de forma irregular na largura do vertedouro.

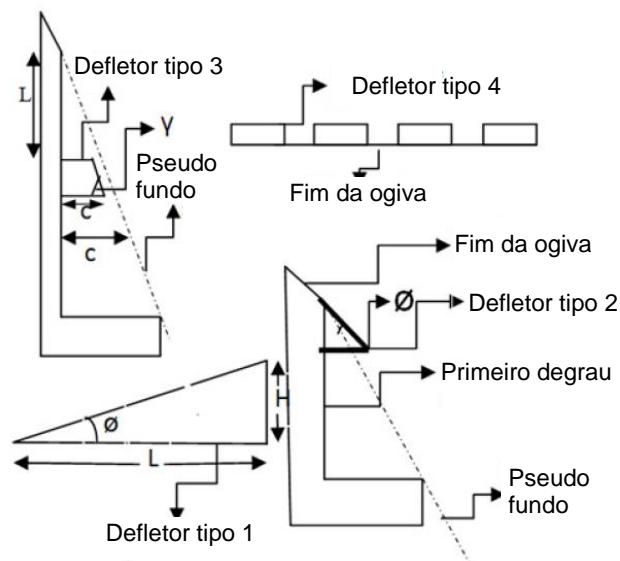


Figura 24 - Detalhe dos tipos de defletores estudados por Mojtaba et al.(2015). Fonte: modificado de Mojtaba et al. (2015).

Os resultados de Mojtaba et al. (2015) mostraram que para o defletor tipo 1, com dimensões constantes, o comprimento do ponto de início de aeração aumenta com aumento da vazão, ou seja, o ponto de início se desloca para jusante e, para uma vazão constante, o comprimento do ponto de início de aeração diminui com o aumento das dimensões do defletor. Para o defletor tipo 2 o ponto de início de aeração aumenta com o aumento das dimensões do defletor, sendo que o ângulo final do defletor é de  $10^\circ$ , pois para ângulos maiores ocorre uma agitação e a formação de ondas na superfície do escoamento. Já o defletor tipo 3 não apresentou influência significativa na posição de início de aeração. E o defletor tipo 4 produz oscilações no escoamento em virtude da redução da largura do vertedouro.

Majtaba et al. (2015), considerando o índice de cavitação crítico  $\sigma = 0,2$ , verificaram que a vazão específica máxima pode ser aumentada com a instalação do defletor de  $36,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para  $50,6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , a qual representaria um aumento de  $38,6\%$ , para o modelo 1 do vertedouro em degraus e de  $30,9 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para  $40,1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para o modelo 2 do vertedouro em degraus, representando um aumento de  $29,3\%$ .

Wang, Hou e Wang (2012) estudaram o efeito da aeração do vertedouro em degraus da Central Elétrica Murum e propuseram um aerador tipo pilar, instalado da ogiva até o espelho do primeiro degrau (Figura 25), para reduzir o dano de cavitação na calha em degraus.

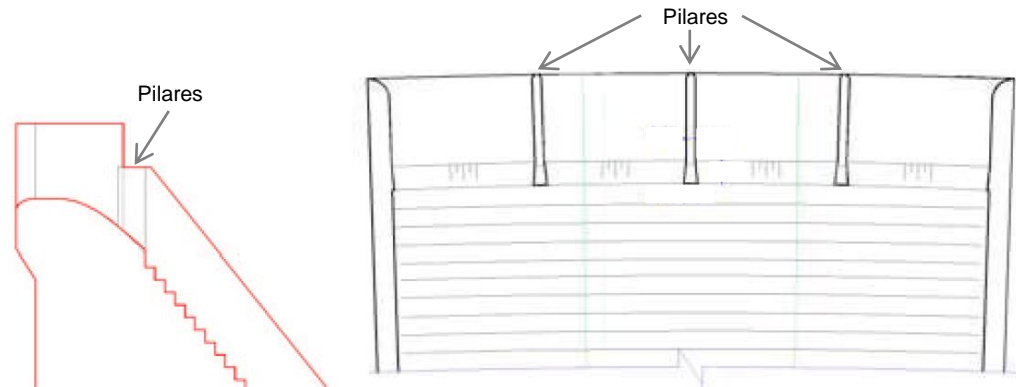


Figura 25 - Aerador tipo pilar estudado por Wang, Hou e Wang (2012). Fonte: adaptado de Wang, Hou e Wang (2012)

Conforme Wang, Hou e Wang (2012), os aeradores pilares formaram cavidades laterais e inferiores no escoamento (Figura 26), fazendo com que o ar fosse incorporado e o ponto de início de aeração antecipado, aumentando a concentração de ar no escoamento, e assim, a possibilidade de ocorrência de cavitação foi reduzida.

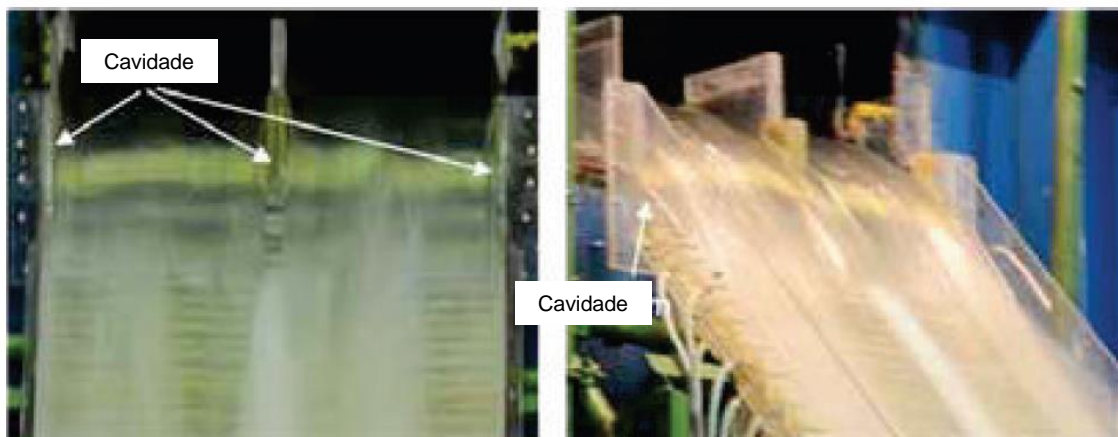


Figura 26 - Cavidades formadas atrás dos aeradores pilares. Fonte: adaptado de Wang, Hou e Wang 2012

Terrier, Pfister e Schleiss (2015), a partir de análise experimental, compararam o efeito de um aerador em vertedouro em degraus e com calha lisa. A Figura 27 (a) apresenta o modelo físico hidráulico de um vertedouro em degraus e a Figura 27 (b) apresenta o esquema do modelo utilizado na pesquisa, o qual possui largura de 0,50 m, comprimento de 6,00 m, inclinação de  $\alpha = 50^\circ$  e degraus com altura de  $h_d = 0,06$  m. Foram utilizados dois tipos de defletores, um com altura de  $t = 0,0150$  m e o outro com altura de  $t = 0,0133$  m, ambos com ângulo de  $\varphi = 5,7^\circ$ . O ar foi fornecido sob o jato por uma ranhura horizontal de 0,02 m de altura, localizada no

espelho do primeiro degrau. Esta ranhura está conectada a uma câmara hermética com grandes dimensões, para evitar perdas, onde o ar ingressa através de um conduto circular.

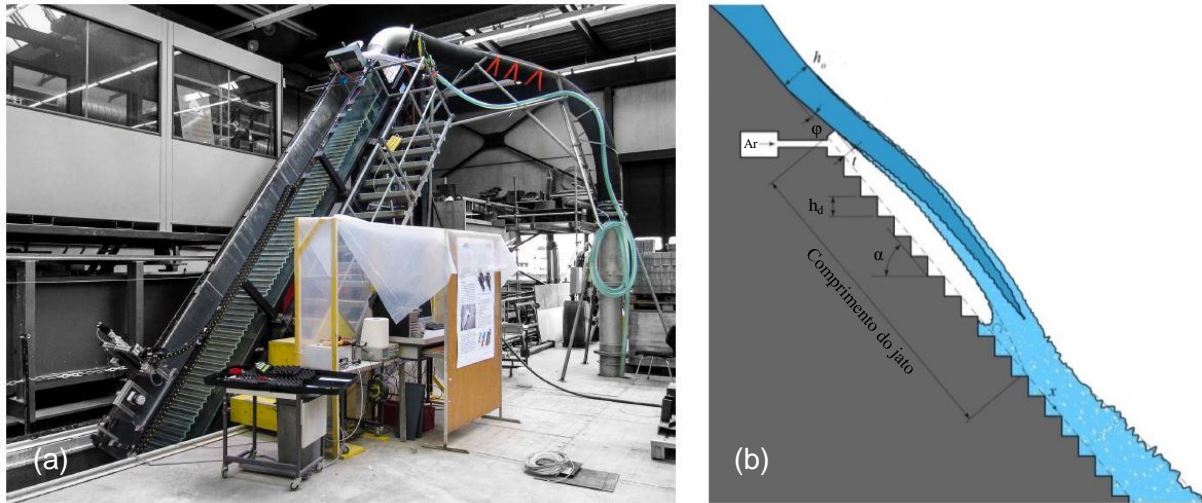


Figura 27 – (a) Modelo físico do vertedouro em degraus com aeração induzida (b) esquema do modelo físico estudado por Terrier (2016). Fonte: adaptado de Terrier (2016).

Os autores verificaram que a concentração de ar a jusante em vertedouros em degraus é mais alta, quando comparada com aeradores de calha lisa, especialmente a concentração de ar inferior. E a concentração de ar inferior é mantida a jusante do impacto do jato e não diminui rapidamente, o que indica que um aerador seria suficiente para vertedouros em degraus.

Posteriormente, Terrier, Pfister e Schleiss (2016), utilizando o mesmo modelo hidráulico de Terrier (2016), abordaram a distribuição espacial resultante da concentração de ar em vertedouros em degraus, modificando o ângulo ( $\phi$ ) e a altura ( $t$ ) do defletor, onde foram testados 5 defletores, com as seguintes características: (1)  $\phi = 9,46^\circ$  e  $t = 0,015$  m; (2)  $\phi = 9,46^\circ$  e  $t = 0,030$  m; (3)  $\phi = 14,04^\circ$  e  $t = 0,015$  m; (4)  $\phi = 14,04^\circ$  e  $t = 0,030$  m; (5)  $\phi = 14,04^\circ$  e  $t = 0,045$  m.

A principal diferença entre os defletores testados foi o comprimento do jato, o que influencia diretamente no coeficiente de arraste do ar. Para defletores mais íngremes, maior concentração de ar é arrastada para o escoamento, porém, mais rapidamente é removido após o impacto do jato. Com isso, o defletor ideal para as condições específicas testadas por Terrier, Pfister e Schleiss (2016), é o defletor (1).

A implementação de pilares na crista de um vertedouro em degraus foi estudada por Calitz (2015) em modelo físico com escala 1:15, declividade 1V:0,8H e

degraus com altura de 0,10 m, com o objetivo de verificar se os pilares antecipam a posição de início de aeração do escoamento e, assim, a vazão específica de vertimento pode ser aumentada, sem risco de danos por cavitação. Para isso, a partir de ensaios em um modelo físico de um vertedouro em degraus com a implementação de duas configurações de pilares (Tipo 1 e Tipo 2) (Figura 28 (a) e (b)) e sem pilar, para as vazões específicas de protótipo de 25 e 30 m<sup>3</sup>/s/m, Calitz (2015) investigou a posição de início de aeração, a concentração de ar no pseudofundo e as pressões na quina superior dos espelhos.



Figura 28 – Pilares instalados no modelo físico de vertedouro em degraus do estudo de Calitz (2015)  
(a) Pilar Tipo 1 e (b) Pilar Tipo 2. Fonte: adaptado de Calitz (2015).

Como resultado da sua investigação experimental, o autor obteve que a posição de início de aeração para o vertedouro em degraus com os dois tipos de pilares foi antecipada quando comparada com o vertedouro sem pilares. No entanto, quando analisada a concentração de ar foram encontrados resultados mais promissores para o pilar Tipo 1, o qual atingiu porcentagens de concentração de ar maiores a montante do ponto de início de aeração e transportou ar para toda a largura do vertedouro. Já no pilar Tipo 2, o ar incorporado foi dispersado rapidamente antes no ponto de início de aeração.

Em relação às pressões mínimas, Calitz (2015) comparou as três configurações (Sem Pilar, Pilar Tipo 1 e Pilar Tipo 2), com a pressão de início de

cavitação, o qual definiu que pressões inferiores a -7 m causariam danos por cavitação. As pressões mínimas adimensionalizadas pela altura do degrau e avaliadas pelo adimensional de posição  $s_i = \frac{L_i - L_a}{H_m}$ , o qual considera a distância do ponto de referência ao longo do vertedouro a partir da crista em metros ( $L_i$ ), a distância do ponto de início de aeração a partir da crista do vertedouro em metros ( $L_a$ ) e a energia a montante da crista em metros ( $H_m$ ), estão apresentados na Figura 29 para as três configurações estudadas.

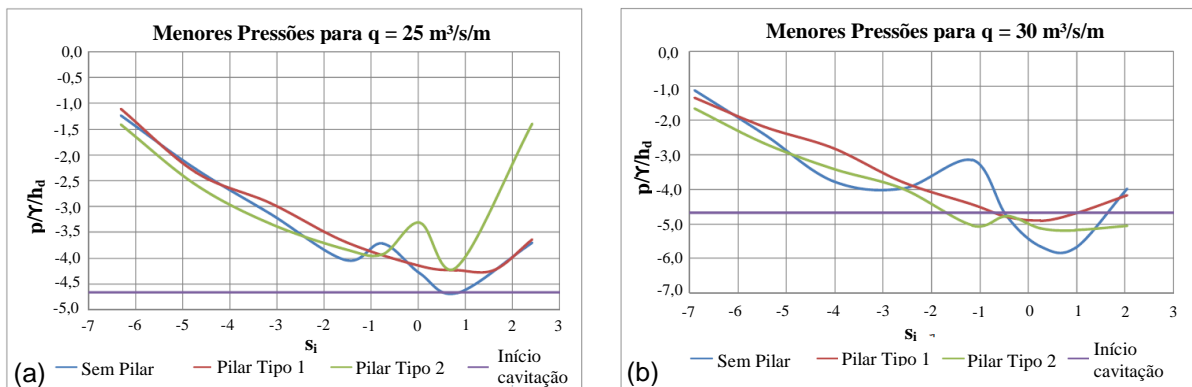


Figura 29 – Menores pressões mínimas ao longo do vertedouro em degraus para as configurações sem pilar, Pilar Tipo 1 e Pilar Tipo 2 para as vazões específicas (a)  $25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (b)  $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Fonte: adaptado de Calitz (2015).

Calitz (2015) verificou que o Pilar Tipo 1 possui melhor desempenho, sendo que as menores pressões mínimas registradas foram a jusante e no ponto de início de aeração e, também, nas laterais do vertedouro. Isso ocorreu, pois a concentração de ar é desigual ao longo da largura da calha do vertedouro e há uma menor concentração de ar neste local, pois o pilar foi instalado no centro da calha.

Para avaliar o potencial de cavitação do vertedouro em degraus, Calitz (2015) utilizou dois métodos. No método A utilizou dados de concentração de ar associado às pressões mínimas encontradas na calha do vertedouro, conforme Figura 30 (a) e (b), sendo que o autor considerou que 8% é a porcentagem crítica de ar necessária para evitar danos por cavitação e para as pressões mínimas definiu que pressões inferiores a -7 m causariam danos por cavitação. O método B considera apenas que pressões inferiores a -7 m devem ser evitadas devido aos possíveis danos por cavitação (Figura 30 (c) e (d)).

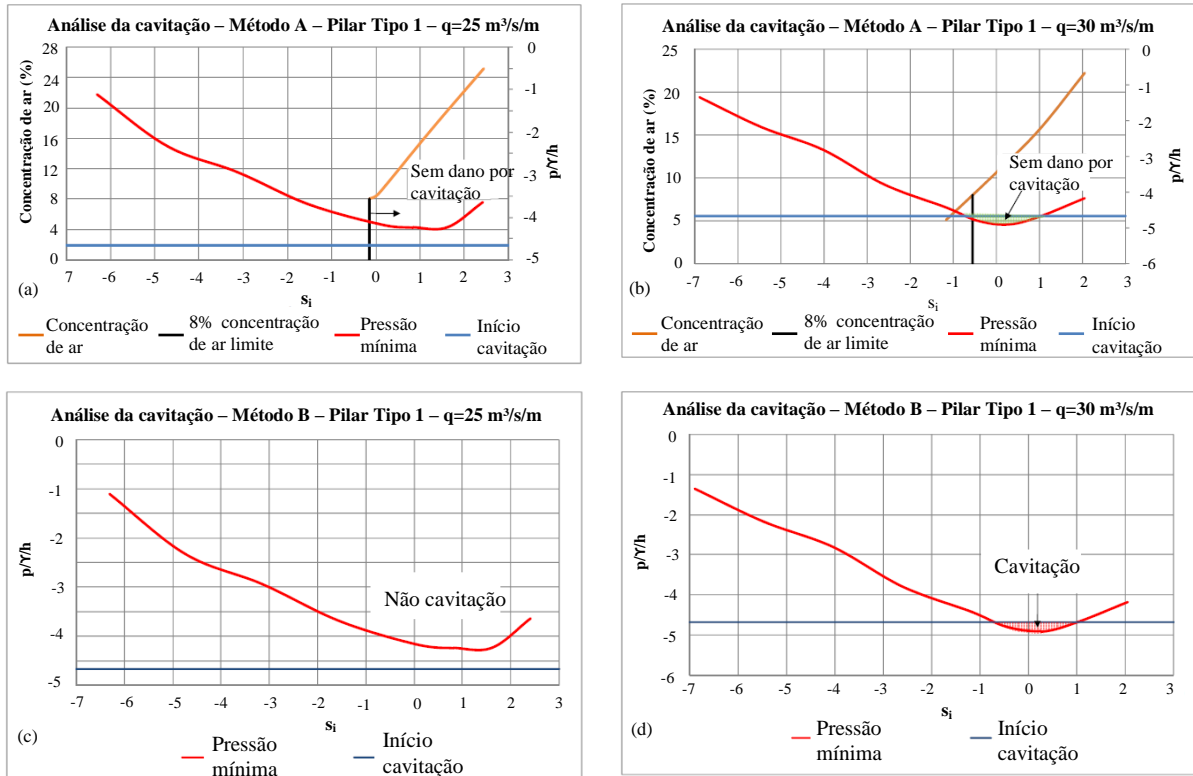


Figura 30 – Análise da cavitação no modelo físico do vertedouro em degraus com pilar Tipo 1 (a) através do método A para  $q=25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ; (b) através do método A para  $q=30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ; (c) através do método B para  $q=25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ; (d) através do método B para  $q=30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Fonte: adaptado de Calitz (2015).

A partir dessas análises o autor verificou que o vertedouro em degraus com pilar Tipo 1 não estaria propenso a riscos de danos por cavitação a partir da vazão específica de  $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , considerando o método A, e, a partir da vazão específica de  $25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para o método B.

A diferença entre as vazões específicas que estão propensas à cavitação, se dá em virtude do método A ser fundamentado na pesquisa realizada por Peterka (1953), onde afirma que uma concentração de ar de aproximadamente 5 a 8% é suficiente para evitar danos por cavitação devido à compressibilidade da mistura ar-água, que absorve o impacto da implosão das bolhas cheias de vapor. Com isso, o autor considerou que mesmo que as pressões mínimas sejam inferiores a pressão de início de cavitação considerada, se a concentração de ar for superior a 8%, as bolhas de ar absorverão a energia que poderia danificar a superfície do vertedouro.

Mais tarde Koen (2017) investigou diferentes geometrias de pilares, em dois modelos físicos de vertedouro em degraus (Tipo A e Tipo B). O modelo físico do vertedouro Tipo A é o mesmo utilizado nas pesquisas de Calitz (2015), no entanto,

as configurações de pilares analisadas por Koen (2017), neste modelo, variaram o comprimento e a geometria de montante do pilar (arredondada e parabólica). Além disso, o autor adicionou-se um alargamento na extremidade de jusante do pilar, chamado de *Flaring Gate Pier* (FGP) e a vazão específica de protótipo ensaiada foi de  $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . A Figura 31 mostra as geometrias dos pilares implementados por Koen (2017) no modelo físico de vertedouro em degraus Tipo A.








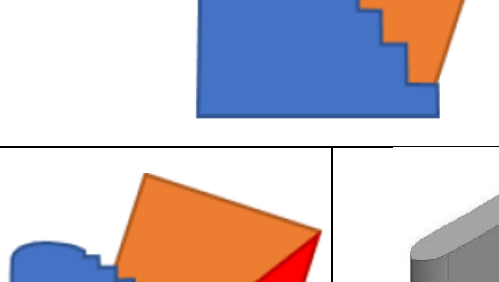


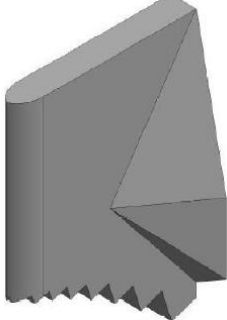

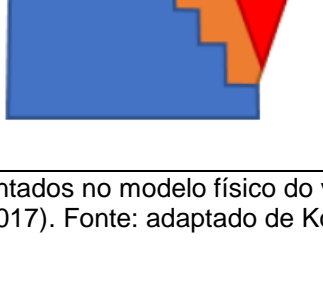
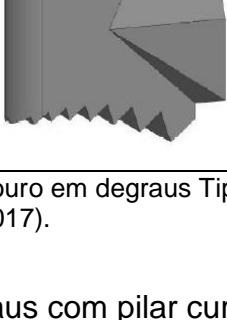
Pilar curto Extremidade a montante arredondada			
Pilar curto Extremidade a montante parabólica			
Pilar longo Extremidade a montante arredondada			
Pilar longo Extremidade a montante parabólica			
Pilar longo + FGP-X Extremidade a montante arredondada			
Pilar longo + FGP-X Extremidade a montante parabólica			

Figura 31 - Geometria dos pilares implementados no modelo físico do vertedouro em degraus Tipo A da pesquisa de Koen (2017). Fonte: adaptado de Koen (2017).

O comportamento do escoamento do vertedouro em degraus com pilar curto e extremidade a montante arredondada foi caracterizado por um redirecionamento acentuado do escoamento, permitindo que uma maior cavidade de ar se formasse atrás do pilar e o ar fosse incorporado ao escoamento. Já para o pilar curto com extremidade a montante parabólica, o escoamento é redirecionado gradualmente, aderindo as laterais do pilar. Para os pilares longos, independentemente da geometria da extremidade de montante, o escoamento também adere as laterais, ou



seja, o comprimento adicional do pilar removeu a aeração da lateral do pilar (Koen, Bosman e Basson, 2019).

A partir dos resultados de concentração de ar e pressões mínimas, Koen (2017) identificou que o melhor desempenho ocorre com a implementação de um pilar curto, com a extremidade de montante arredondada no vertedouro em degraus, sendo que o mesmo pode operar com uma vazão específica de  $30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , sem riscos de danos por cavitação.

No vertedouro do Tipo B foram inseridos pilares com geometrias baseadas nos pilares da barragem Dachaoshan na China, *Flaring Gate Pier* (FGP) em forma de X e Y, conforme Figura 32. O modelo físico Tipo B possui escala 1:50, inclinação da calha é de  $55^\circ$  e a altura do degrau de 0,02 m e foi constituído de três vãos de descarga.

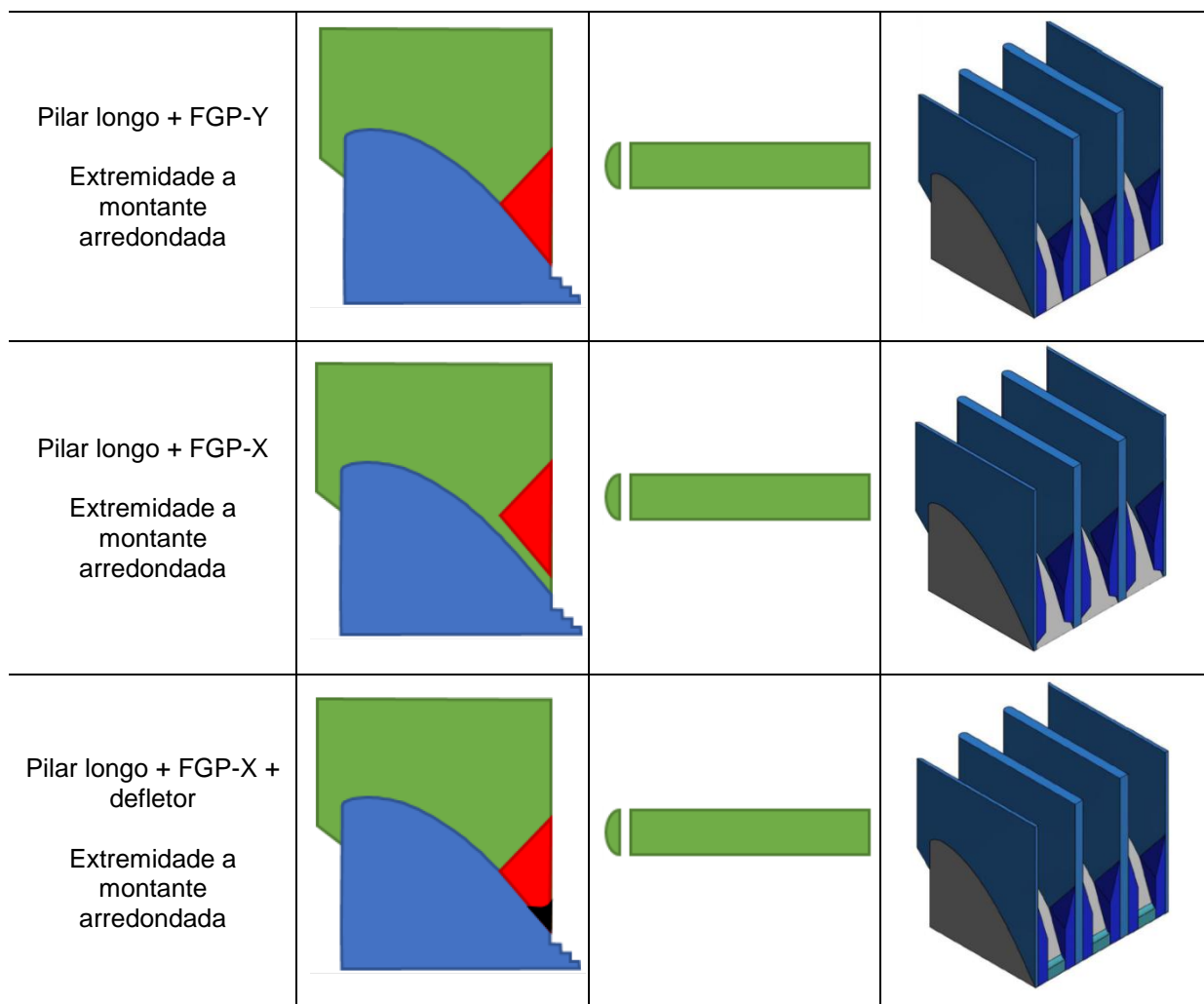


Figura 32 - Geometria dos pilares implementados no modelo físico do vertedouro em degraus Tipo B da pesquisa de Koen (2017). Fonte: adaptado de Koen (2017).

Segundo Koen, Bosman e Basson (2019), o objetivo do alargamento dos pilares é contrair o fluxo, resultando em um jato estreito com alta velocidade, criando superfícies ar-água onde o ar é incorporado ao escoamento. A Figura 33 compara o escoamento para as três configurações analisadas pelo autor, onde percebe-se que as características do escoamento do vertedouro em degraus com os pilares FGP-X e FGP-Y são semelhantes. Ressalta-se, contudo, que o FGP-Y é caracterizado pela contração e lançamento para cima do escoamento, como um salto esqui, e, para o FGP-X parte do escoamento inferior não é desviado, reduzindo o lançamento do escoamento. E a inserção do defletor combinado com o FGP-Y induz o jato a se dispersar em um plano vertical, resultando em uma área de impacto longa.



Figura 33 – Comparação do escoamento para a vazão específica de  $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para o vertedouro em degraus com (a) pilar FGP-Y, (b) pilar FGP-X e pilar FGP-Y + defletor. Fonte: adaptado de Koen, Bosman e Basson (2019)

Koen (2017) e Koen, Bosman e Basson (2019) analisaram a cavitação através da apresentação gráfica dos resultados da concentração de ar e das pressões mínimas (percentil de 0,15%) atuantes ao longo do comprimento da calha, comparando com o modelo do vertedouro em degraus sem pilares e a partir dos valores críticos de concentração de ar e pressão, os quais foram definidos pelos autores em 8% e -7 m.c.a. A Figura 34 apresenta os resultados de Koen, Bosman e Basson (2019) para o vertedouro em degraus com pilares FGP-Y e FGP-X, respectivamente, para a vazão específica de  $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , onde a pressão mínima está adimensionalizada pela altura do degrau ( $h_d$ ).

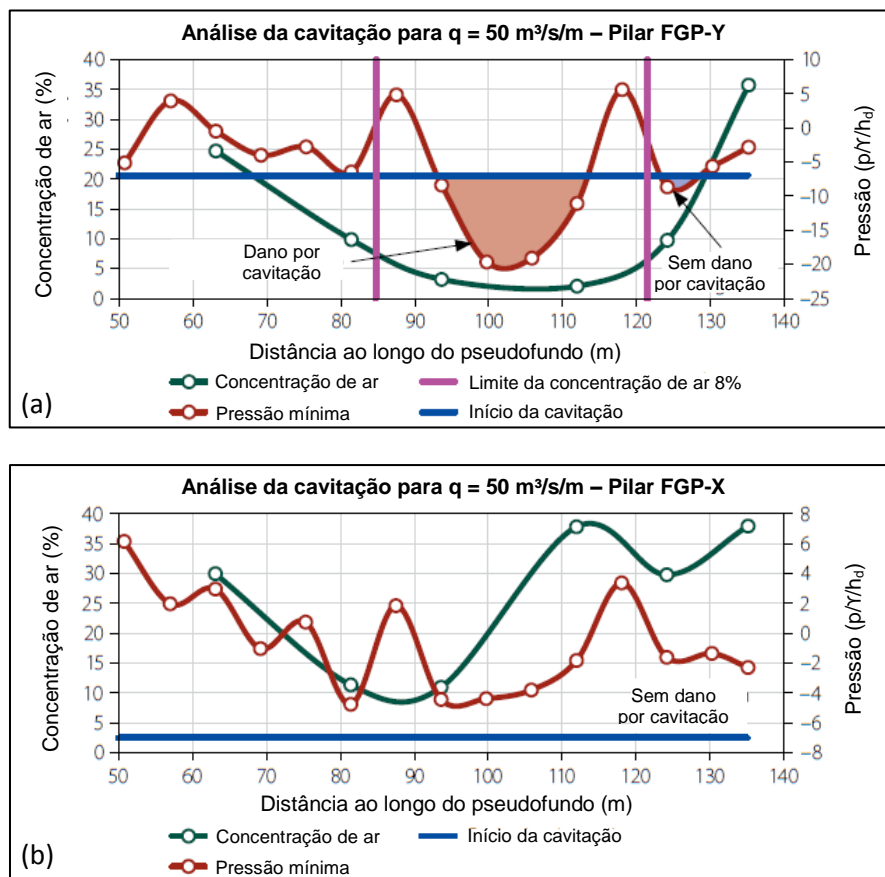


Figura 34 - Análise da cavitação a partir de dados de concentração de ar e pressões mínimas para o vertedouro em degraus com (a) pilar FGP-Y e (b) pilar FGP-X. Fonte: adaptado de Koen, Bosman e Basson (2019).

Os autores constaram que para vertedouro em degraus com pilar FGP-Y se observaram regiões com probabilidade de ocorrência de cavitação, visto que, ocorreram pressões mínimas inferiores a -7 m.c.a. e concentrações de ar inferiores a 8%. Para o pilar FGP-X foram registradas concentrações de ar acima de 8% e não foram registradas pressões mínimas inferiores a pressão a -7 m.c.a. em nenhuma posição ao longo da calha. Com isso se pode aumentar a capacidade de descarga máxima para  $50 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para essa configuração (Koen, 2017 e Koen, Bosman e Basson, 2019).

Através de análise experimental em um modelo físico de um vertedouro em degraus com declividade  $1V:0,75H$ , degraus com espelho de 0,06 m e patamar de 0,045 m, Canellas et al. (2017), comparou as características do escoamento ao longo da calha em degraus com aeração natural e aeração induzida por pilar. A posição de início de aeração e a pressão média nos espelhos e patamares foram comparadas em ambos os modelos. Para os ensaios com aeração natural, a calha possui largura de 0,034 m a partir do início da ogiva até o pé do vertedouro e para a

aeração induzida por pilares, do início da ogiva até o primeiro degrau a calha possui largura de 0,034 m e a jusante a largura da calha aumenta para 0,040 m, representando pilares de 0,03 m de largura.

Os autores verificaram que a aeração induzida por pilares tem a tendência de antecipar a posição de início de aeração, em virtude da introdução de ar através da descontinuidade do escoamento junto aos pilares. As pressões médias nos patamares e nos espelhos foram adimensionalizadas pela energia de montante em relação à quina de cada degrau ( $P/\gamma Z_i$ ). A posição da seção ao longo da calha do vertedouro a partir do início da ogiva ( $L$ ) foi adimensionalizada em relação à profundidade crítica do escoamento ( $h_c$ ) e do número de Froude rugoso ( $F^*$ ), conforme mostrado na Figura 35 (a) e (b).

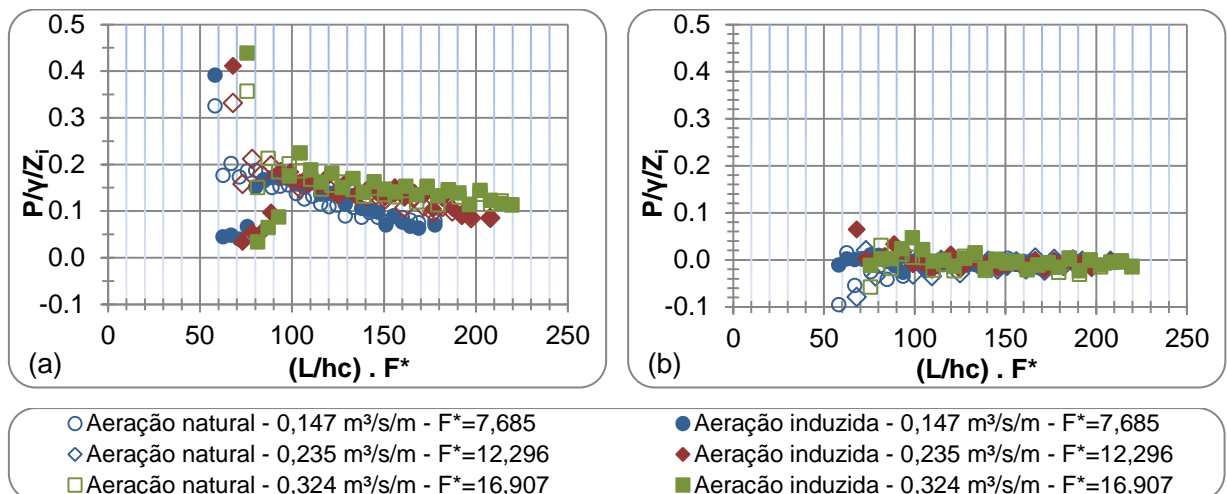


Figura 35 – Pressões médias adimensionalizadas (a) patamares e (b) espelhos do estudo de Canellas et al. (2017). Fonte: adaptado de Canellas et al. (2017).

Canellas et al. (2017) concluiu que há influência da aeração induzida por pilares no escoamento em relação à aeração natural do vertedouro em degraus nas pressões médias do patamar até a posição adimensional em torno de 100, onde as pressões médias referentes à aeração induzida por pilares são menores que as pressões médias referentes a aeração natural, com exceção do primeiro ponto. Para os espelhos, a aeração natural apresenta pressões médias negativas, enquanto que para a aeração induzida por pilar tende a ficar em torno de zero, também, até a posição adimensional em torno de 100. A partir desta posição os adimensionais de pressão média são praticamente os mesmos para os patamares e espelhos,

indicando que o efeito da aeração induzida pelo pilar no espelho já não tem mais influência.

Apesar da aeração induzida por pilares antecipar a aeração do escoamento e amortecerem as pressões médias dos patamares e espelhos, o modelo físico utilizado para a realização dos ensaios possui uma largura pequena, podendo influenciar na distribuição de ar ao longo de um mesmo degrau, sendo que este comportamento pode não ocorrer para calhas de vertedouros com largura maior, conforme Canellas et al. (2017).

### **3 METODOLOGIA**

A fim de avaliar as características do escoamento e os esforços hidrodinâmicos atuantes em vertedouros em degraus com aeração induzida por pilares e pilares + defletores, a base metodológica desta pesquisa se inicia por uma investigação experimental detalhada sobre as características hidráulicas do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida em dois modelos físicos hidráulicos e, seguida de posterior avaliação dos resultados experimentais, através de métodos estatísticos e parâmetros adimensionais.

Neste item estão descritas as instalações experimentais, a aquisição de dados, bem como a instrumentação utilizada e o processo de aferição, as condições de ensaios durante a investigação experimental e a metodologia analítica para a análise dos dados.

#### **3.1 Instalação Experimental**

Os estudos experimentais desta pesquisa foram desenvolvidos em dois modelos físicos de vertedouro em degrau, um implantado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e o outro instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) de FURNAS Centrais Elétricas. Foram utilizados dois modelos físicos para investigação da influência da largura da calha na aeração induzida por pilares e defletores.

##### **3.1.1 Instalação Experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS**

O modelo físico de um vertedouro em degraus instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas tem como escala para transposição dos seus valores a razão de 1:10, e foi utilizado para a compreensão e definição das características do comportamento hidráulico do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e defletor.

O modelo físico conta com o sistema de alimentação de água, o canal de montante, a ogiva, a calha do vertedouro em degraus e a bacia de dissipação, conforme Figura 36.



Figura 36 – Vista geral do modelo físico do vertedouro em degraus instalado no LOH

O sistema de armazenamento de água é composto por um reservatório inferior, com capacidade de 600 m<sup>3</sup>. A água é bombeada deste reservatório para o sistema, através de uma bomba centrífuga de 75 CV de potência, a qual opera em conjunto com um inversor de frequência para a variação das vazões ensaiadas.

As vazões foram medidas através de um medidor eletromagnético de vazão, instalado junto à tubulação em ferro fundido de 300 mm de diâmetro, que alimenta o canal a montante do vertedouro em degraus e possui 0,40 m de largura.

A seção de interesse do estudo é composta pela ogiva e pela calha vertente, executadas com chapas de ferro galvanizadas e as paredes laterais da calha do vertedouro com chapas de acrílico transparente fixadas em perfis metálicos, de forma a permitir a visualização do escoamento.

O perfil da ogiva do vertedouro é do tipo Creager e foi projetado para uma carga de projeto no modelo de 0,40 m e determinada pela Equação 9, conforme

representado na Figura 37. A ogiva foi instalada no final do canal de montante do modelo reduzido do vertedouro em degraus.

$$y = 1,08945 \cdot x^{1,85}$$

Equação 9

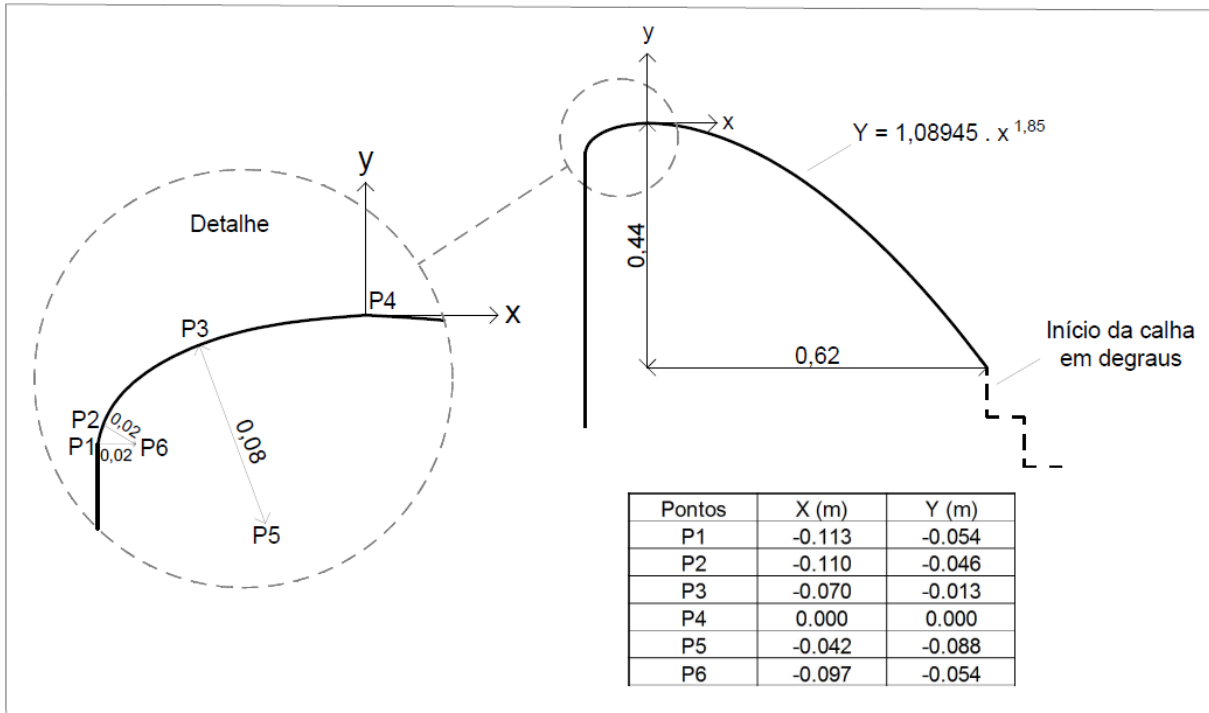


Figura 37 - Detalhe da crista do vertedouro em degraus (dimensões em metros)

A calha em degraus, representada pelas vistas superior e lateral, na Figura 38 e na Figura 39, respectivamente, possui declividade de 1,00V:0,75H e largura de 0,40 m. Os degraus da calha vertente possuem 0,06 m de altura no espelho e 0,045 m de largura no patamar. A altura do vertedouro, ou seja, o desnível entre a crista do vertedouro e a bacia de dissipação é de 2,44 m.

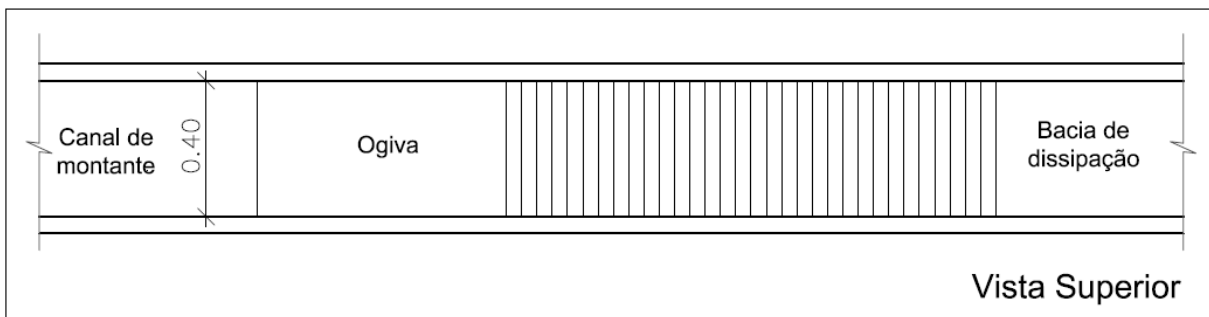


Figura 38 - Vista superior do vertedouro em degraus LOH I (dimensões em metros)



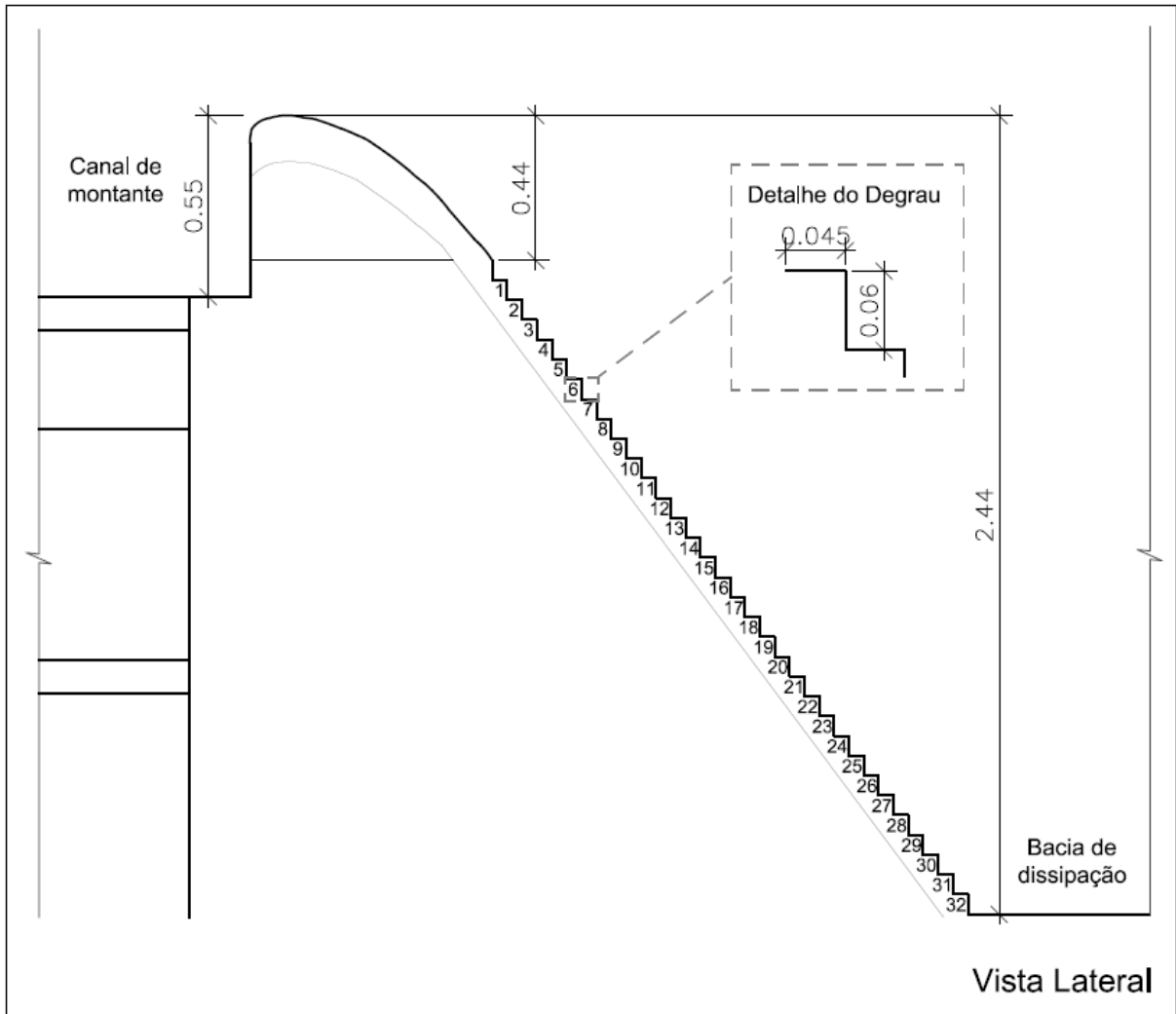


Figura 39 – Vista lateral do vertedouro em degraus do LOH I (dimensões em metros)

À jusante da calha do vertedouro em degraus, está localizada a bacia de dissipação, a qual conta com o canal com 7 m de comprimento total, no entanto, para este trabalho, o comportamento do escoamento na bacia de dissipação não será abordado.

A fim de caracterizar o escoamento em vertedouros em degraus com aeração induzida em relação à aeração natural, se inseriram pilares e defletor, com as geometrias representadas na Figura 40 (a) e (b), respectivamente.

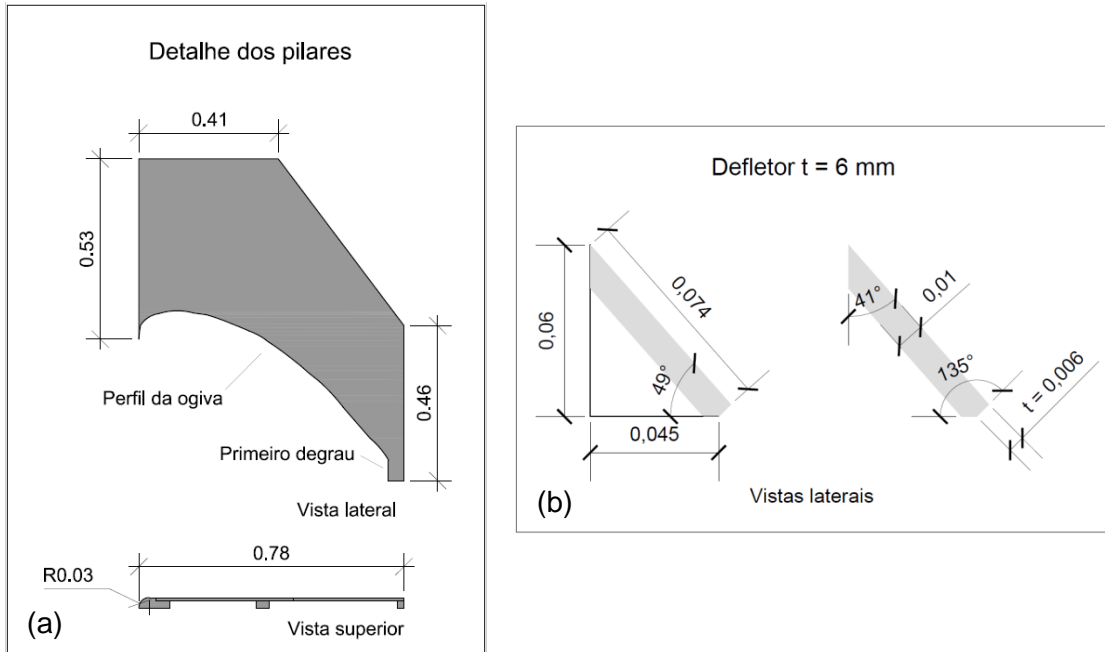


Figura 40 – Detalhe (a) dos pilares e (b) do defletor (dimensões em metros)

Foram inseridos dois meios pilares de acrílico, cada um com 0,03 m de espessura, a partir do início da ogiva, acompanhando seu perfil, até o fim do primeiro degrau, conforme a geometria representada através da Figura 40 (a) e sua instalação representada na Figura 41 e Figura 42. Esse comprimento foi definido a partir da análise visual do escoamento, sendo também analisado o comportamento do escoamento com pilares instalados até o final da ogiva, no entanto, o mesmo foi descartado devido ao deslocamento do volume de água no interior do primeiro degrau para as laterais, causando uma instabilidade no escoamento e a ocorrência de respingos de água nessa região.

Os pilares foram instalados nas laterais da calha do vertedouro de modo que o vão entre os pilares possua maior largura e os efeitos das paredes laterais sejam minimizados.

O defletor representado na Figura 40 (b) foi inserido no primeiro degrau, o mesmo possui altura em relação ao pseudofundo (t) de 0,006 m, conforme indicado na Figura 40b. Na Figura 41 (a) e na Figura 42 (a) e (b) se pode visualizar o defletor instalado no modelo, juntamente com os pilares.

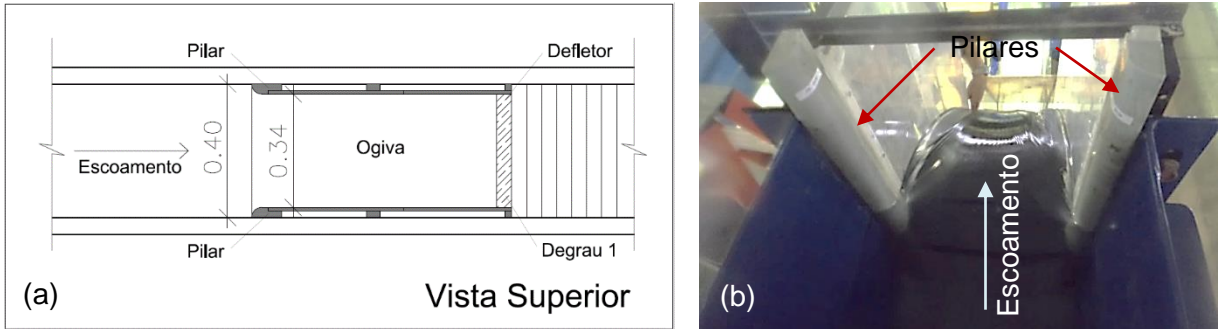


Figura 41 – (a) Vista superior do modelo do LOH I com pilares e defletor instalados e (b) visualização do superior do escoamento

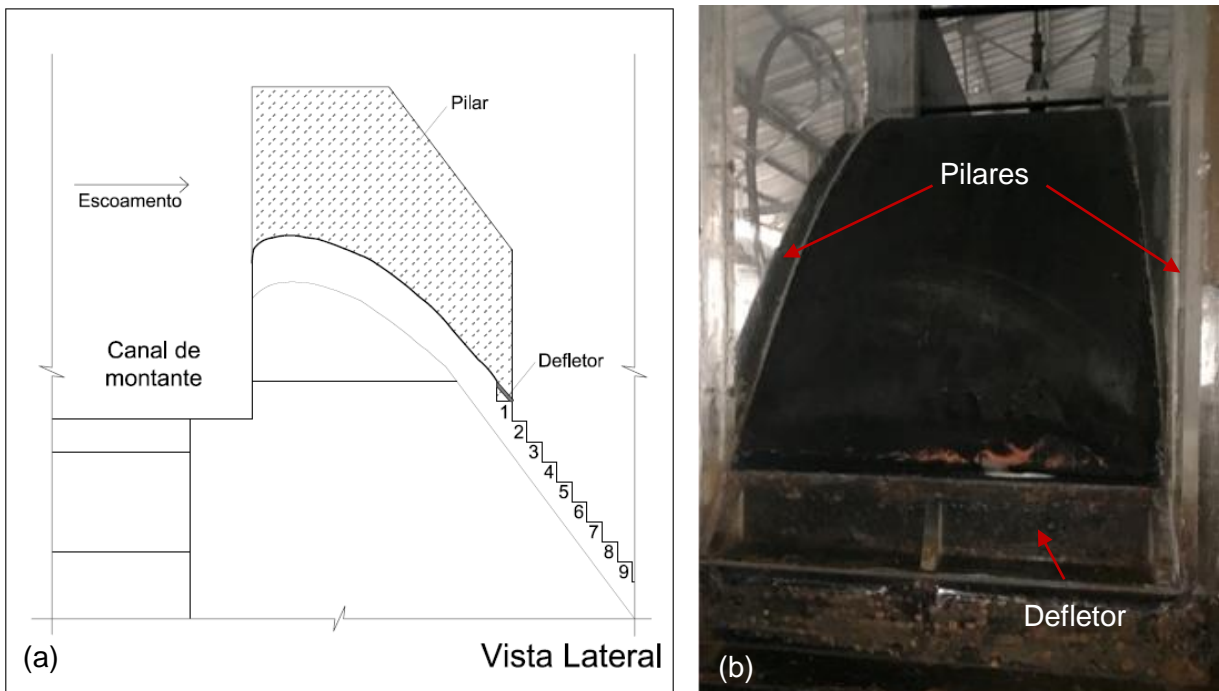


Figura 42 – (a) Vista lateral e (b) vista frontal do modelo do LOH I com pilares e defletor instalados.

A extremidade de montante dos pilares, que possuem contato direto com o sentido do escoamento, possui formato arredondado com raio de 0,03 m (Figura 41 (c) e (d)), de forma a minimizar possíveis instabilidades do escoamento nessa região.

Na região em que os pilares foram instalados, como cada meio pilar possui 0,03 m, a largura do vão de calha livre foi reduzida para 0,34 m, como indicado na Figura 41 (a) e, com isso, o escoamento também sofreu estreitamento, conforme pode-se visualizar na Figura 41 (b).

### 3.1.2 Instalação Experimental do Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas

O modelo físico de um vertedouro em degraus instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas é composto por um sistema de armazenamento de água, que além do modelo físico do vertedouro em degraus, alimenta outros modelos reduzidos. Este sistema conta com um reservatório inferior, que, através de seis conjuntos motor-bombas, de 40 e 50 CV de potência, bombeiam água para o reservatório superior (Figura 43a), que opera em nível constante. As vazões foram controladas por um registro gaveta e medidas através de um medidor eletromagnético (Figura 43b), acoplado à tubulação de aço carbono.

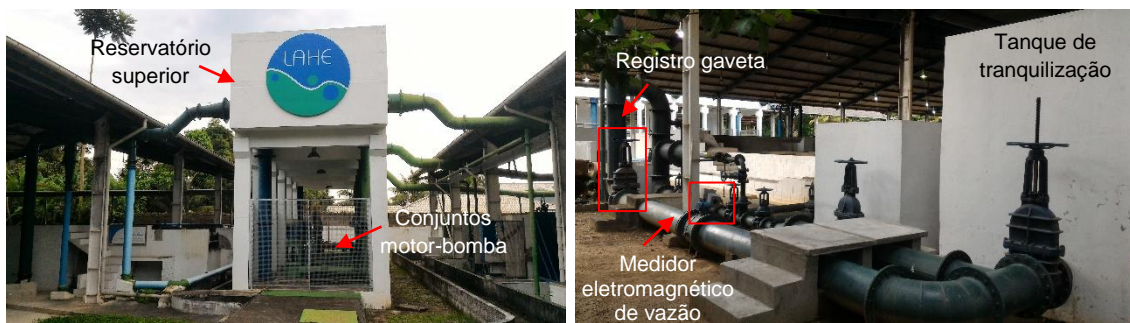


Figura 43 - Sistema de (a) armazenamento de água e (b) alimentação do modelo.

A tubulação que alimenta o modelo possui diâmetro 400 mm e conduz a água do reservatório superior até o tanque tranquilizador (Figura 44a), junto ao canal de montante do vertedouro em degraus (Figura 44b). A entrada do escoamento do tanque para o canal de montante ocorre por meio de um sistema de tranquilização, constituído de tijolos furados, conforme pode ser visualizado na Figura 44a.



Figura 44 - (a) Poço tranquilizador e (b) canal de montante

O perfil da ogiva do modelo físico do vertedouro do LAHE é igual à ogiva do modelo do LOH I, do tipo Creager e também determinada pela Equação 9. A ogiva

foi instalada no final do canal de montante do modelo reduzido do vertedouro em degraus.

A calha do vertedouro em degraus é constituída de argamassa e possui declividade de 1,00V:0,75H e degraus de 0,09 m de altura no espelho e o patamar com largura de 0,0675 m, conforme a Figura 45 e a Figura 46, que mostram a vista superior e lateral do vertedouro. O modelo, em escala 1:10, possui largura de 1,15 m e altura do vertedouro é de 2,30 m.

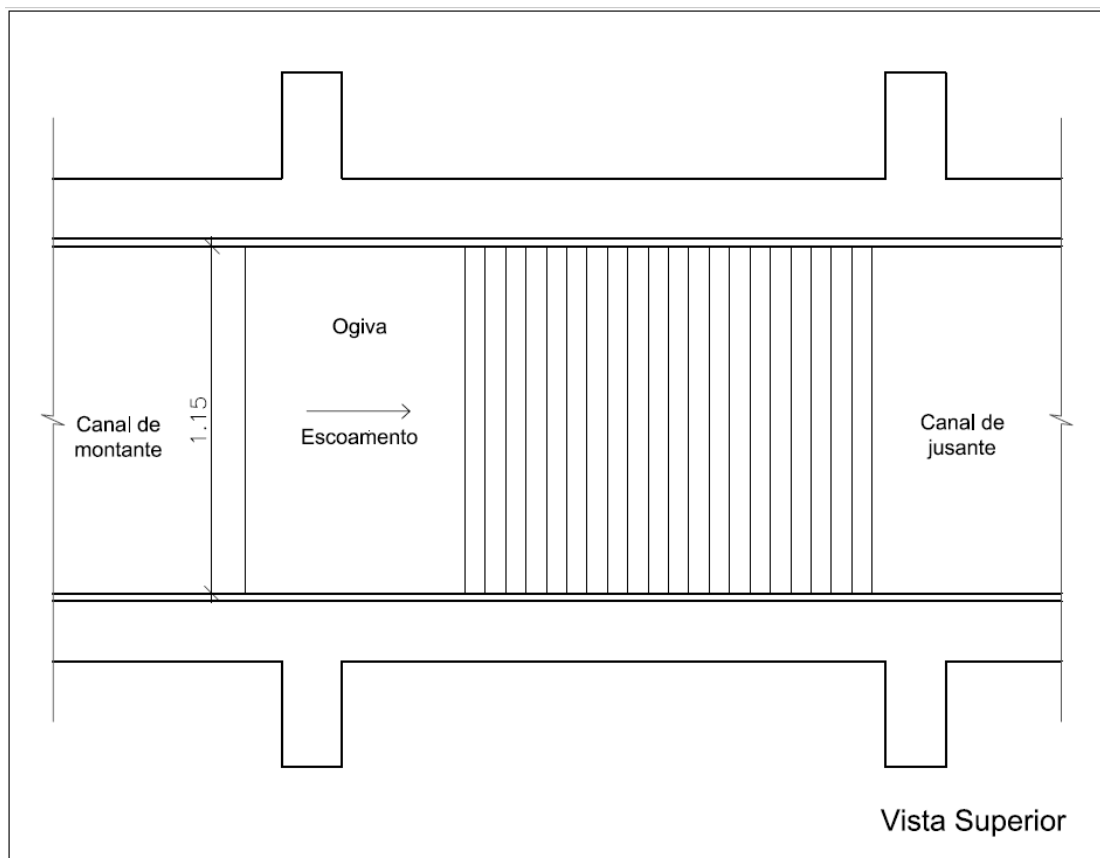


Figura 45 – Vista superior do vertedouro em degraus do LAHE

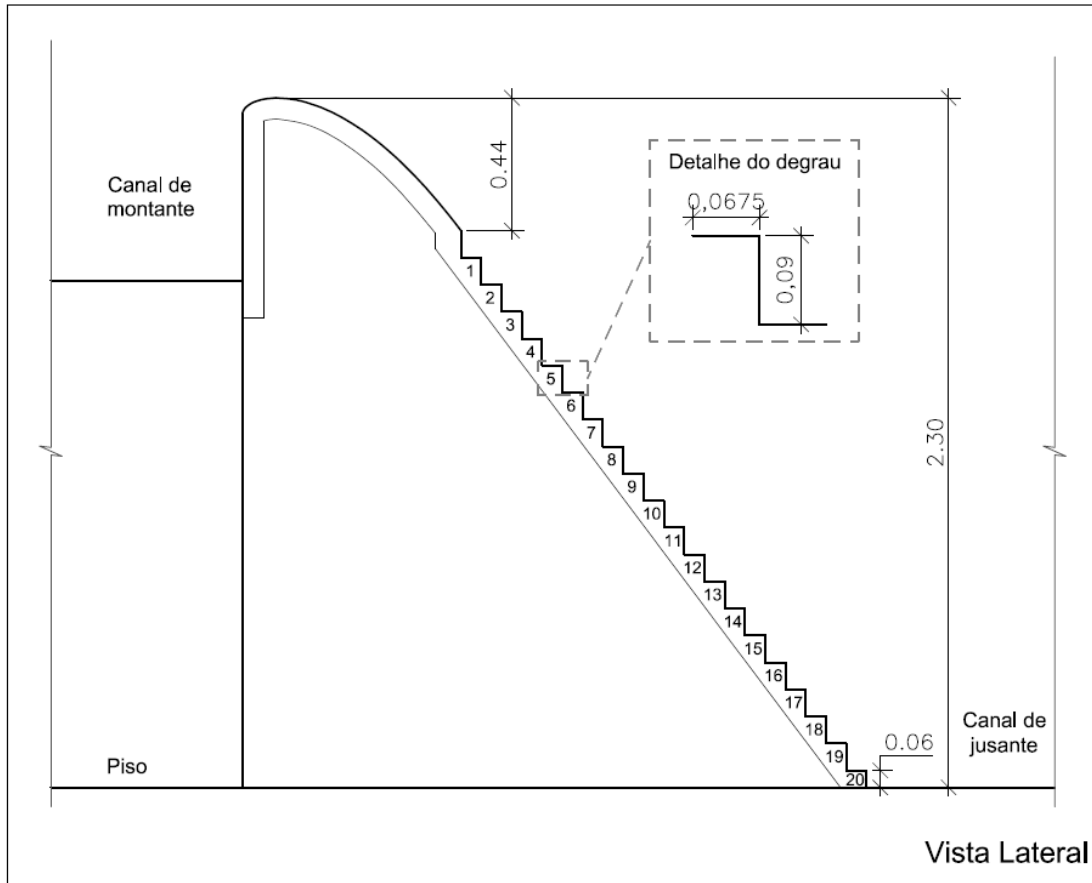


Figura 46 - Vista lateral do vertedouro em degraus do LAHE

Neste modelo reduzido foram inseridos pilares e quatro modelos de defletores para a análise do comportamento da aeração induzida por estes dispositivos em relação à aeração natural do escoamento. As dimensões e geometrias dos pilares e defletores estão detalhadas na Figura 47 e na Figura 48.

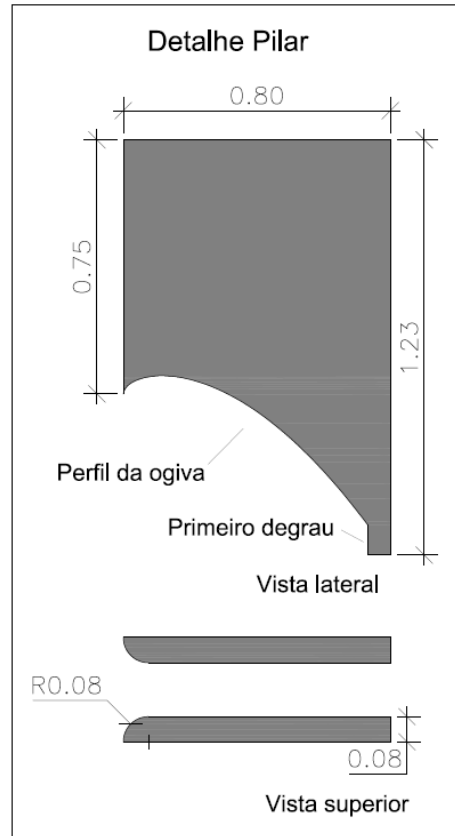


Figura 47 - Detalhe dos pilares

Os meios pilares foram instalados nas laterais sobre a ogiva até o primeiro degrau do vertedouro, desta forma, sua geometria inferior acompanha o perfil da ogiva. A espessura de cada meio pilar é de 0,075 m e a extremidade que tem contato direto com o escoamento possui formato arredondado com raio de 0,075 m. De acordo com as limitações do modelo, a espessura dos pilares foi definida de modo que, a largura do vão entre os pilares em modelo, fosse similar a largura do vão entre pilares em uma estrutura real.

Os quatro modelos de defletores diferenciam na sua espessura em relação ao pseudofundo:  $t = 0$  mm (Figura 48 (a)),  $t = 3$  mm (Figura 48 (b)),  $t = 6$  mm (Figura 48 (c)) e  $t = 9$  mm (Figura 48 (d)). As espessuras dos defletores foram escolhidas de forma a avaliar a influência do lançamento do escoamento sobre os degraus, sendo limitada a espessura  $t = 9$  mm, visto que com valores de  $t$  superiores, o escoamento não se desenvolve na calha em degraus, em virtude, do lançamento do escoamento sobre os degraus quando entra em contato com o defletor.

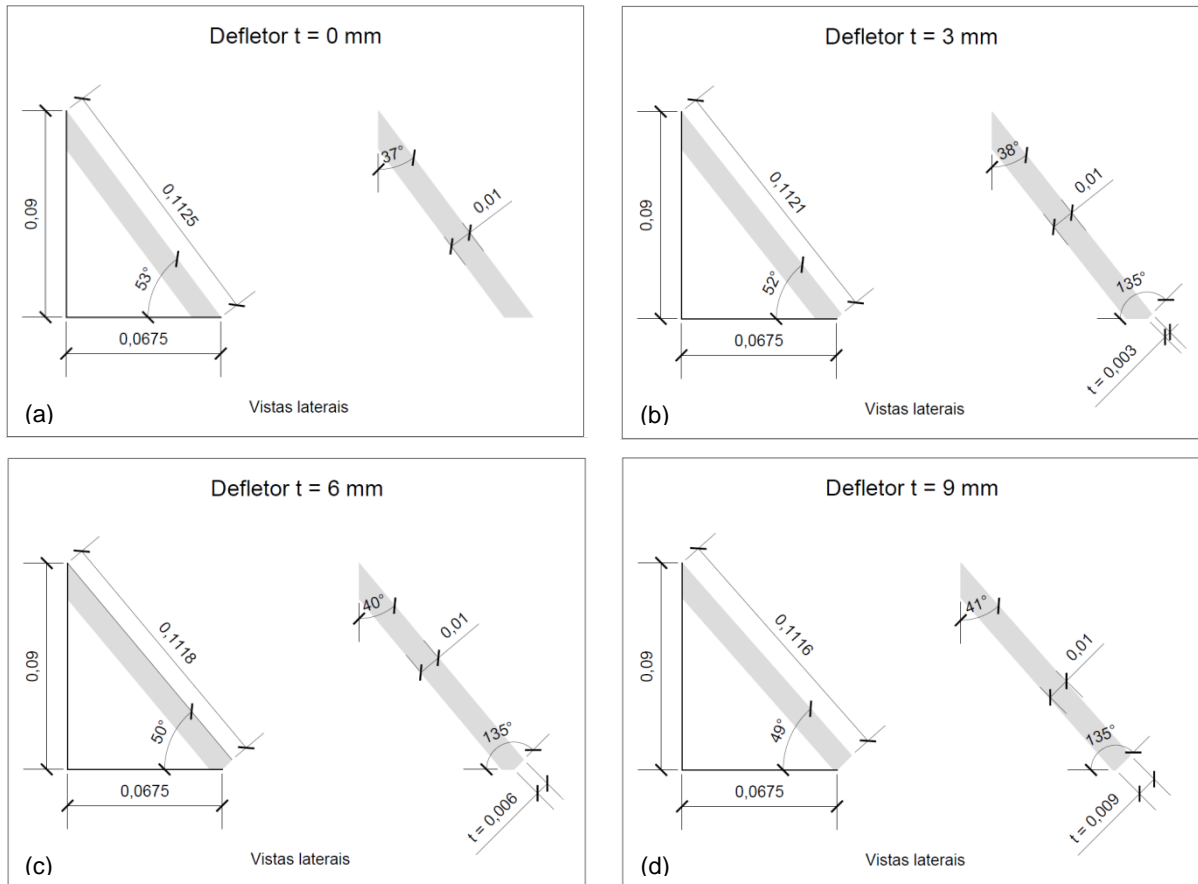


Figura 48 - Defletores (a) 0 mm, (b) 3 mm, (c) 6 mm e (d) 9 mm.

Em configurações de ensaios distintos, foram instalados os quatro diferentes modelos de defletores, variando sua espessura em relação ao pseudofundo, e conseqüentemente, o seu ângulo, a fim de analisar o comportamento do escoamento ao longo da calha em degraus e a direção do jato de água que verte sobre a ogiva.

Na Figura 49 (a), (b), (c) e (d) pode-se visualizar os pilares e defletor instalados no modelo do LAHE.



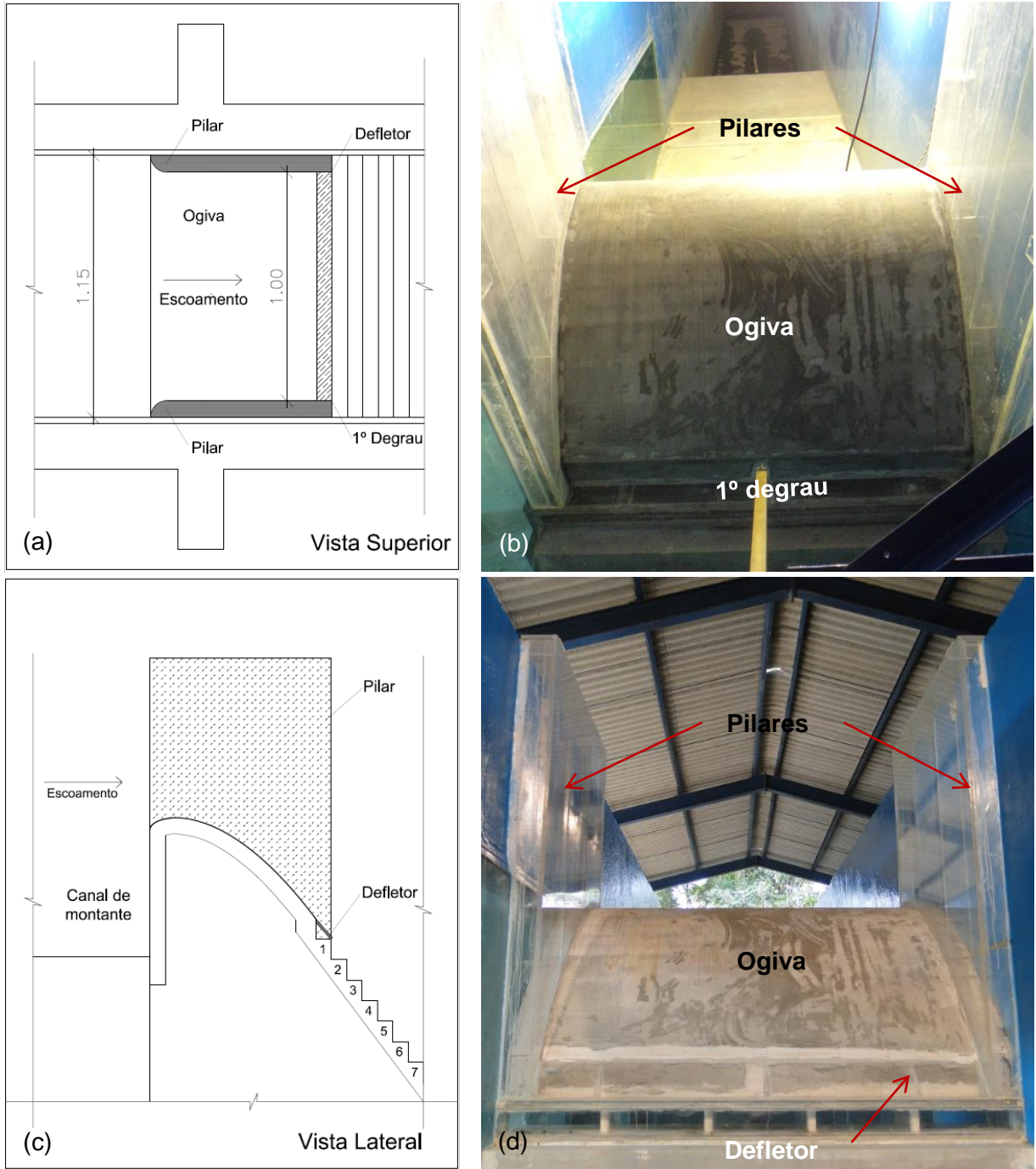


Figura 49 – (a) Vista superior, (c) Vista lateral do modelo do LAHE com pilares e defletor instalados, (b) Pilares e (d) Pilares e defletor instalados no modelo do LAHE

Na região da ogiva até o primeiro degrau, onde os pilares foram instalados, a largura da calha possui 1,00 m, como indicado na Figura 49 (a), causando uma redução e, posterior, alargamento no escoamento, a partir do segundo degrau da calha.

Com os pilares nas laterais do vertedouro foram ensaiadas as configurações com aeração induzida por pilares (Figura 49 (b)) e, também a aeração induzida por

pilares + defletores 0, 3, 6 e 9 mm, onde os mesmos foram instalados no primeiro degrau do vertedouro, conforme pode-se visualizar na Figura 49 (d).

### **3.2 Coleta de dados**

Para determinar as características do comportamento hidráulico do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida, realizou-se a medição de grandezas físicas hidráulicas: pressões médias, pressões “instantâneas” e níveis de água, e, foram identificados visualmente, comportamentos característicos do escoamento e, também, referentes à aeração do escoamento, durante a realização dos ensaios.

#### **3.2.1 Pressões ao longo da calha**

A determinação das pressões atuantes nas quinas dos degraus do vertedouro foi realizada através de piezômetros convencionais para obtenção de pressões médias e através de transdutores de pressão para a obtenção de pressões instantâneas.

As tomadas de pressão estão dispostas na quina externa do espelho e do patamar dos degraus. Os dois modelos possuem uma relação entre as distâncias da quina até a tomada de pressão de  $0,0833.B_d$  (m) para o patamar e  $0,0833.H_d$  (m) para o espelho (Figura 50). Para o modelo do LOH I, na quina externa do patamar, as tomadas estão a uma distância de 5,0 mm e na quina externa do espelho a 4,0 mm de distância. Já para o modelo do LAHE, a distância entre a quina externa do patamar e a tomada de pressão é de 5,6 mm e do espelho a 7,5 mm.

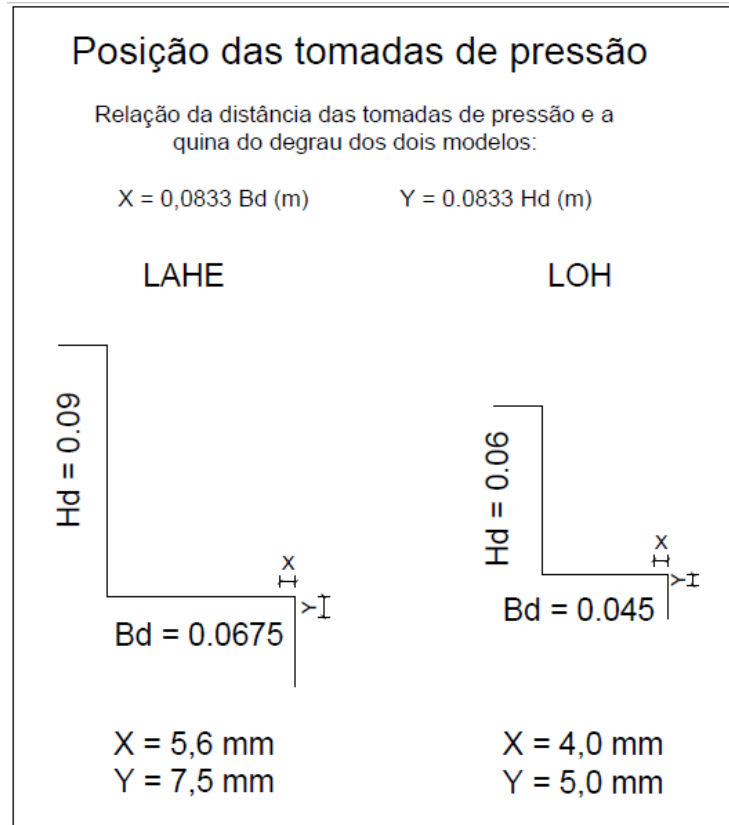


Figura 50 – Posição das tomadas de pressão dos dois modelos.

A leitura das pressões médias, coletadas através de piezômetros convencionais, foi realizada em quadros piezométricos, os quais são graduados milimetricamente e referenciados com cada ponto de medição.

As pressões flutuantes foram coletadas com transdutores de pressão conectados nas tomadas de pressão através de mangueiras com comprimento em torno de 0,20 m e diâmetro de 0,017 m, em ambos os modelos. O comprimento e o diâmetro da mangueira utilizada para conectar o transdutor à tomada de pressão estão de acordo com as recomendações de Lopardo (1986) e Trieweler Neto (2006).

### **3.2.1.1 Aquisição de pressões ao longo da calha do modelo experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS**

No modelo físico experimental do LOH as tomadas de pressão para aquisição de pressão média e instantânea estão instalados na linha central da calha nos espelhos e patamares dos 31 degraus.

Os ensaios para adquirir as pressões “instantâneas” foram divididos em duas etapas, sendo que na primeira foram medidas as pressões instantâneas nos degraus ímpares e na segunda etapa os degraus pares.

As flutuações de pressões foram coletadas com transdutores de pressão à frequência de 100Hz com 10 minutos de duração de forma simultânea para todas tomadas de pressão e para cada vazão de ensaio. O tempo e a frequência para a aquisição dos dados foram escolhidos de maneira que permitisse uma coleta representativa sem interferência dos resultados a serem gerados, com base nas recomendações de Lopardo (1986) e em pesquisas anteriores realizadas no laboratório.

Os transdutores de pressão piezorresistivos utilizados nos ensaios do modelo físico instalado no LOH são da marca ZURICH, modelo PSI.420, precisão de 0,1% FE, INSTRUTEMP, modelo GT P1000, com precisão 0,5% FE e SITRON, modelo SP96, com precisão de  $\pm 0,5\%$  FE, operando em diferentes faixas de acordo com a posição da tomada de pressão. A Tabela 3 mostra as faixas de operação de cada transdutor e a posição em que cada um foi instalado.

A calibração dos transdutores de pressão foi realizada anteriormente ao início da coleta de dados, onde se relacionou valores de tensão (Volts) a diferentes níveis d'água, obtendo assim, para cada transdutor sua própria curva de calibração, com o auxílio do software LabView.

Os transdutores de pressão foram conectados a uma caixa de aquisição, que transmite esses sinais para um conversor analógico digital da marca *National Instruments*, modelo USB-6225, com resolução de 16 bits e faixa admissível de – 10 a 10V e operada mediante o software LabView.

Tabela 3 - Faixa de operação dos transdutores ao longo da calha em degraus no modelo físico vertedouro em degraus do LOH

	Degrau	Faixa de operação (m.c.a.)		Degrau	Faixa de operação (m.c.a.)
Patamar	2	-1,055 a 1,758	Espelho	1	-1,055 a 1,758
	3	-1,055 a 1,758		2	-1,055 a 1,758
	4	-1,055 a 1,758		3	-1,055 a 1,758
	5	-1,055 a 1,758		4	-1,055 a 1,758
	6	-1,055 a 1,758		5	-1,055 a 1,758
	7	-1,055 a 1,758		6	-1,055 a 1,758
	8	-1,055 a 1,758		7	-1,530 a 1,530
	9	-1,055 a 1,758		8	-1,530 a 1,530
	10	-1,055 a 1,758		9	-1,530 a 1,530
	11	-1,055 a 1,758		10	-1,530 a 1,530
	12	-1,055 a 1,758		11	-1,530 a 3,059
	14	-1,055 a 1,758		12	-1,530 a 3,059
	15	-1,055 a 1,758		13	-1,530 a 1,530
	16	-1,055 a 1,758		14	-1,530 a 1,530
	17	-1,055 a 1,758		15	-1,000 a 1,000
	18	-1,055 a 1,758		16	-1,000 a 1,000
	19	-0,714 a 2,753		17	-1,000 a 1,000
	20	-0,714 a 2,753		18	-1,000 a 1,000
	21	-0,714 a 2,753		19	-0,714 a 2,753
	22	-0,714 a 2,753		20	-1,055 a 1,758
	23	-0,714 a 2,753		21	-1,530 a 1,530
	24	-0,714 a 2,753		22	-1,530 a 1,530
	25	-0,714 a 2,753		23	-1,530 a 1,530
	26	-0,714 a 2,753		24	-1,530 a 1,530
	27	-0,714 a 2,753		25	-1,530 a 1,530
	28	-0,714 a 2,753		26	-1,530 a 1,530
	29	-0,714 a 2,753		27	-1,530 a 1,530
	30	-0,714 a 2,753		28	-1,530 a 1,530
	31	-0,714 a 2,753		29	-1,530 a 1,530
				30	-1,530 a 1,530
				31	-2,141 a 2,141

### 3.2.1.2 Aquisição de pressões ao longo da calha do modelo experimental do Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas

As tomadas de pressão do modelo do LAHE estão localizadas na linha central da calha e os degraus instrumentados com piezômetros e transdutores de pressão estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Degraus instrumentados com piezômetro e transdutores de pressão no modelo físico vertedouro em degraus do LAHE

<b>Degraus instrumentados</b>	
<b>Patamar</b>	<b>Espelho</b>
2	2
	3
4	
5	5
	7
8	8
9	
11	11
12	12
	14
15	15
16	

Em virtude do número insuficiente de transdutores de pressão para instrumentar todos os degraus do modelo, os patamares e espelhos descritos na Tabela 4 foram escolhidos de maneira a representar todas as regiões do escoamento sobre vertedouro em degraus.

As pressões instantâneas foram coletadas com transdutores de pressão a frequência de 100Hz com 10 minutos de duração de forma simultânea para todas tomadas de pressão e para cada condição de ensaio.

Os transdutores de pressão piezorresistivos utilizados nos ensaios do modelo físico instalado no LAHE são da marca ZURICH, modelo PSI.420, precisão de 0,1% FE, operando em diferentes faixas de acordo com a posição da tomada de pressão. A Tabela 5 mostra as faixas de operação de cada transdutor e a posição em que cada um foi instalado.

Tabela 5 - Faixa de operação dos transdutores ao longo da calha em degraus no modelo físico vertedouro em degraus do LAHE

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

Anteriormente à aquisição dos dados de pressão ao longo da calha em degraus, os transdutores de pressão foram submetidos a um processo de calibração estática, relacionando valores de tensão (Volts) a diferentes níveis d'água, obtendo assim, para cada transdutor sua própria curva de calibração, com o auxílio do software AqDados.

Os dados de flutuações de pressões foram adquiridos através de um microcomputador e um sistema de aquisição de dados modular e integrado, da marca LYNX Tecnologia. Para coletar os sinais dos transdutores de pressão foi utilizado o software AqDados 7.02 da LYNX Tecnologia.

### 3.2.2 Níveis de água

O nível da água foi verificado em ambos os modelos no canal a montante do vertedouro em degraus (Figura 51a), a fim de determinar a altura do escoamento a montante da crista e para a verificação da estabilidade das vazões impostas.

Para a determinação da altura de água no fim da ogiva e o início do primeiro degrau foi instalada uma ponta linimétrica no centro da largura do canal e

perpendicular ao plano da calha formando pela quina externa dos degraus, também em ambos os modelos (Figura 51b).

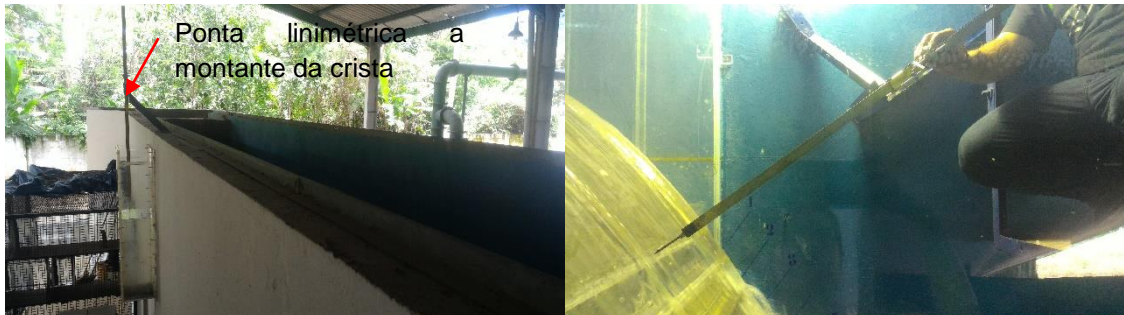


Figura 51 - Medição do nível de água (a) a montante da crista do vertedouro (b) no fim da ogiva e início do primeiro degrau no modelo instalado no LAHE

### 3.2.3 Comportamento e aeração do escoamento ao longo da calha

O comportamento e as posições características do escoamento ao longo da calha, como a posição do impacto do escoamento nos degraus ( $L_{ij}$ ) (Figura 52), para as configurações com defletores, a posição de início da aeração inferior do escoamento ( $L_f$ ) e a posição de início da aeração superficial do escoamento parcial ( $L_a$ ) e total (Figura 53) foram realizadas através da visualização do escoamento sobre o vertedouro em degraus e análise de fotografias e vídeos.

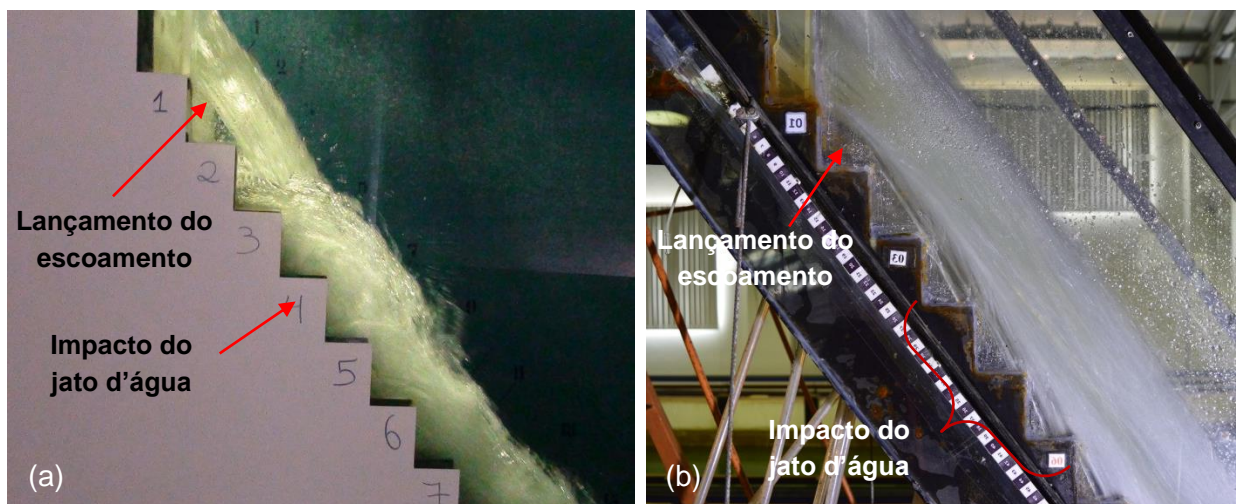


Figura 52 – Visualização do escoamento e identificação do lançamento do escoamento e posição do impacto do jato d'água (a) Vertedouro em degraus LAHE (b) Vertedouro em degraus LOH I



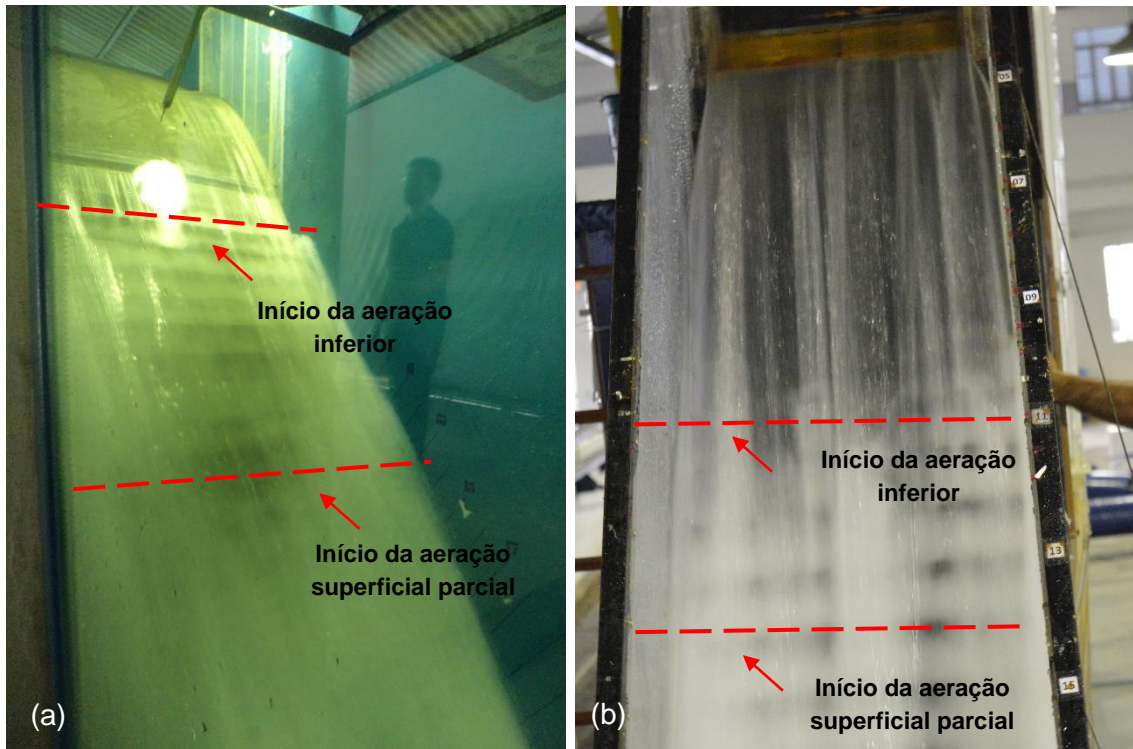


Figura 53 – Visualização do escoamento para identificação das posições de início de aeração (a) Vertedouro em degraus LAHE (b) Vertedouro em degraus LOH I

### 3.3 Condição de ensaio

As vazões ensaiadas em cada modelo foram definidas considerando a equivalência de vazões entre o modelo do LOH I e do LAHE e, também, a capacidade de escoamento de cada modelo, sendo que para o modelo do LOH I a vazão máxima de escoamento é em torno de 110 l/s, limitada pelo canal de aproximação e, para o modelo do LAHE a vazão máxima escoada é em torno de 410 l/s.

A Tabela 6 apresenta as vazões totais e específicas do escoamento correspondentes em cada modelo e em protótipo, e, o número de Froude rugoso. As vazões correspondentes em cada modelo estão na mesma linha da Tabela 6.

Tabela 6 – Vazões totais e específicas do escoamento em modelo e protótipo e número de Froude rugoso

Modelo LOH I - Escala 1:10				Modelo LAHE - Escala 1:10			
Q modelo (l/s)	q modelo (m <sup>3</sup> /s/m)	q protótipo (m <sup>3</sup> /s/m)	F*	Q modelo (l/s)	q modelo (m <sup>3</sup> /s/m)	q protótipo (m <sup>3</sup> /s/m)	F*
40	0,100	3,2	5,23	115	0,100	3,2	2,85
				144	0,125	3,9	3,56
60	0,150	4,7	7,84	173	0,150	4,8	4,27
80	0,200	6,3	10,45	230	0,200	6,3	5,69
110	0,275	8,7	14,37	316	0,275	8,7	7,82
				380	0,330	10,5	9,38
				409	0,356	11,3	10,13

No modelo físico experimental do vertedouro em degraus instalado no LOH foram realizados ensaios com aeração induzida por pilares, instalados no início da ogiva até o primeiro degrau e um defletor com espessura de 6 mm instalado no primeiro degrau (Figura 54), para a compreensão e definição das características do comportamento hidráulico do escoamento.

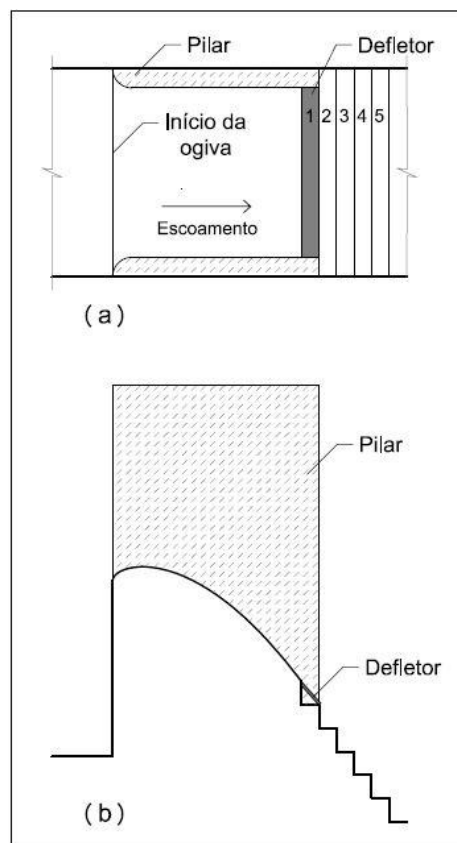


Figura 54 – Aeradores instalados no modelo (a) Vista lateral e (b) vista superior

No modelo físico experimental do vertedouro em degraus instalado no LAHE foram realizadas seis configurações de ensaios:

- aeração natural (Figura 55 (a) e (b));
- aeração induzida por pilares (sem defletor) (Figura 55 (c) e (d));
- aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm;
- aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm;
- aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e;
- aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm.

A Figura 55 (e) e (f) ilustram o esquema de instalação das quatro últimas configurações. Ressalta-se que os pilares, tanto na configuração com aeração induzida apenas por pilares quanto nas configurações com aeração induzida por pilares + defletores, foram instalados do início da ogiva até o primeiro degrau e os defletores, e na configuração com aeração induzida por pilares + defletores, os defletores, ilustrados na Figura 48, foram instalados no primeiro degrau do vertedouro.

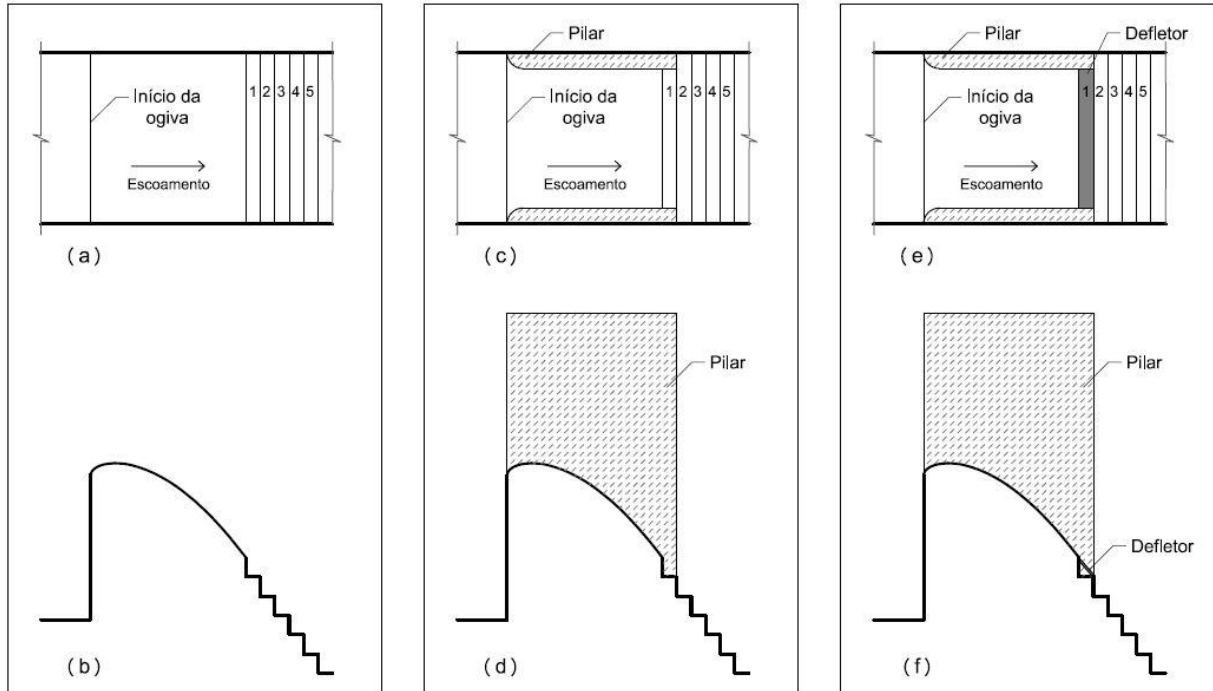


Figura 55 - Esquema de configuração de ensaios (a) Vista lateral aeração natural, (b) vista superior aeração natural, (c) Vista lateral aeração induzida por pilares, (d) vista superior aeração induzida por pilares (sem defletor), (e) Vista lateral aeração induzida por pilares + defletor, (f) vista superior aeração induzida por pilares + defletor.

### 3.4 Metodologia analítica

Após a coleta dos dados nos modelos físicos hidráulicos, estes foram tratados experimentalmente com métodos da estatística clássica como: média, desvio padrão e os percentis de  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$  e analisados na sua forma dimensional, em metros por coluna d'água (m.c.a.), sendo os dados dos patamares e espelhos dos degraus das configurações de aeração induzida foram comparados com a aeração natural do escoamento ao longo do vertedouro.

Para o conjunto de dados das pressões “instantâneas”, primeiramente, foi calculada a média aritmética simples para cada configuração e vazão ensaiada, e posteriormente, o valor da média obtido foi descontado de cada valor de pressão instantânea. Utilizando os dados de pressão instantânea com média zero, evita-se possíveis erros de calibração nos transdutores, considerando apenas a variação do sinal de pressão obtido pelo transdutor.

O desvio padrão ( $\sigma$ ) foi calculado para as amostras de pressão instantânea, indicando quanto às observações diferem entre si e a sua variação em torno da média aritmética do conjunto amostral.

Os percentis de  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$  também foram determinados para o conjunto de dados de pressões “instantâneas” com média zero e, posteriormente, somados com a média dos piezômetros convencionais. Estes parâmetros indicam, estatisticamente, as pressões “instantâneas” medidas e atribuídas a uma probabilidade de não-excedência 0,1%, 1,0%, 99,0% e 99,9% ao longo do tempo.

Para o modelo do LAHE, as posições características do escoamento com aeração induzida ( $L_{ij}$ , posição do impacto do escoamento nos degraus, para as configurações defletores,  $L_f$ , posição de início da aeração inferior do escoamento e  $L_a$ , posição de início da aeração superficial do escoamento), os menores valores de pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% e 1,0% e os maiores valores de pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,0 e 99,9% e, as posições em que os mesmos ocorrem ao longo do vertedouro em degraus, foram analisadas na sua forma dimensional e, também, adimensional.

Através do software CurveExpert se identificou a função que melhor se ajustou para o conjunto de dados adimensionalizados, possibilitando uma previsão aproximada da localização de cada posição característica e dos menores valores de pressões com probabilidade de não-excedência de 0,1% e os maiores valores de

pressões com probabilidade de não-excedência de 99,9%, para um determinado protótipo de vertedouro em degraus.

### **3.5 Comparação dos resultados – Estudo de Calitz (2015)**

Para comparar os resultados dos parâmetros calculados com base nas medições de pressão da configuração com aeração induzida por pilares do presente estudo se utilizou os dados do estudo de Calitz (2015), que investigou através de um modelo reduzido de um vertedouro em degraus, com escala 1:15, se a implementação de um pilar na ogiva do vertedouro introduz ar ao escoamento a ponto de antecipar a posição de início de aeração e, assim, vazões maiores que as recomendadas na literatura possam escoar sobre o vertedouro, sem riscos de danos por cavitação.

O modelo físico reduzido de um vertedouro em degraus instalado no LAHE, o qual foi utilizado no presente estudo, possui características semelhantes ao modelo reduzido do estudo de Calitz (2015). A comparação das principais características dos modelos consta na Tabela 7.

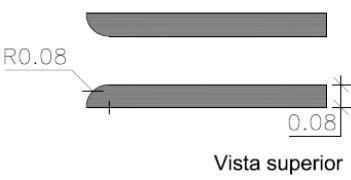
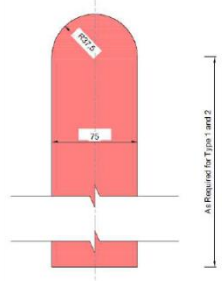
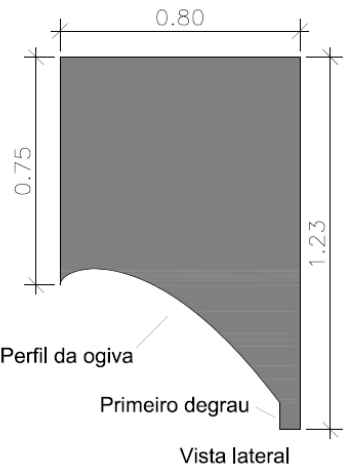
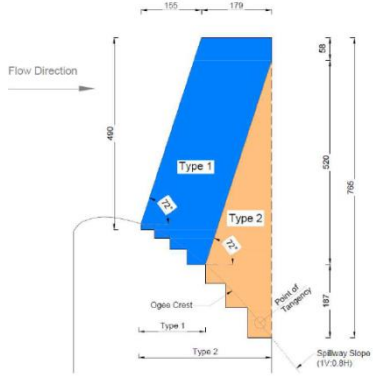
As pressões foram medidas com transdutores de pressões à frequência de 100 Hz, com duração de 10 minutos. As pressões mínimas foram representadas pelo percentil de 0,15%, e, foram definidas a partir de três desvios padrão da média, assumindo que o conjunto de dados segue uma distribuição normal.

Na realização dos ensaios, Calitz (2015) manteve a altura de água sobre a ogiva constante, com isso, as vazões, para a configuração sem pilar e com pilar foram diferentes. Para a configuração sem pilar as vazões específicas ensaiadas em protótipo correspondem a 25 e 30 m<sup>3</sup>/s/m e em modelo a 0,430 e 0,516 m<sup>3</sup>/s/m, já para as configurações com pilares Tipo 1 e Tipo 2 as vazões específicas de protótipo que foram ensaiadas correspondem a 24,2 e 28,5 m<sup>3</sup>/s/m e para o modelo a 0,417 e 0,490 m<sup>3</sup>/s/m.

Como o modelo utilizado no estudo de Calitz (2015) possui escala de transposição 1:15, maior que a escala do modelo do LAHE, que possui escala 1:10, as vazões específicas em protótipo são superiores, desta forma, para ser possível a comparação dos dados de pressões mínimas, utilizou-se as vazões específicas de modelo de ambos. As vazões específicas que foram utilizadas para a comparação dos dados de pressão foram 0,356 m<sup>3</sup>/s/m para o modelo do LAHE e para o modelo

sem pilar e com pilar de Calitz (2015) as vazões específicas de 0,430 e 0,417 m<sup>3</sup>/s/m, respectivamente.

Tabela 7 - Comparação das principais características do modelo do LAHE e do modelo utilizado por Calitz (2015).

	<b>Modelo LAHE</b>	<b>Modelo Calitz (2015)</b>
Altura do degrau (m)	0,09	0,10
Largura do degrau (m)	0,0675	0,08
Declividade da calha (°)	53,3	51,3
Largura da calha (m)	1,15	1,00
Escala	1:10	1:15
Posição do transdutor	0,833Hd	0,9Hd
Geometria do Pilar	 <p>Vista superior</p>	
Visualização do pilar na crista do vertedouro	 <p>Vista lateral</p>	

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste item serão apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir da investigação experimental com o objetivo de avaliar as características hidráulicas do escoamento e os esforços atuantes em vertedouros em degraus com aeração induzida por pilares e pilares + defletores.

### 4.1 Resultados da Instalação Experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas – LOH-UFRGS

#### 4.1.1 Comportamento do escoamento ao longo do vertedouro em degraus – Modelo LOH I

Através da visualização do comportamento do escoamento com aeração induzida por pilares + defletor de 6mm identificou-se, conforme pode-se visualizar na Figura 56 (a), que o escoamento após entrar em contato com o defletor, é lançado para jusante, sobre os degraus imediatamente subsequentes ao defletor.

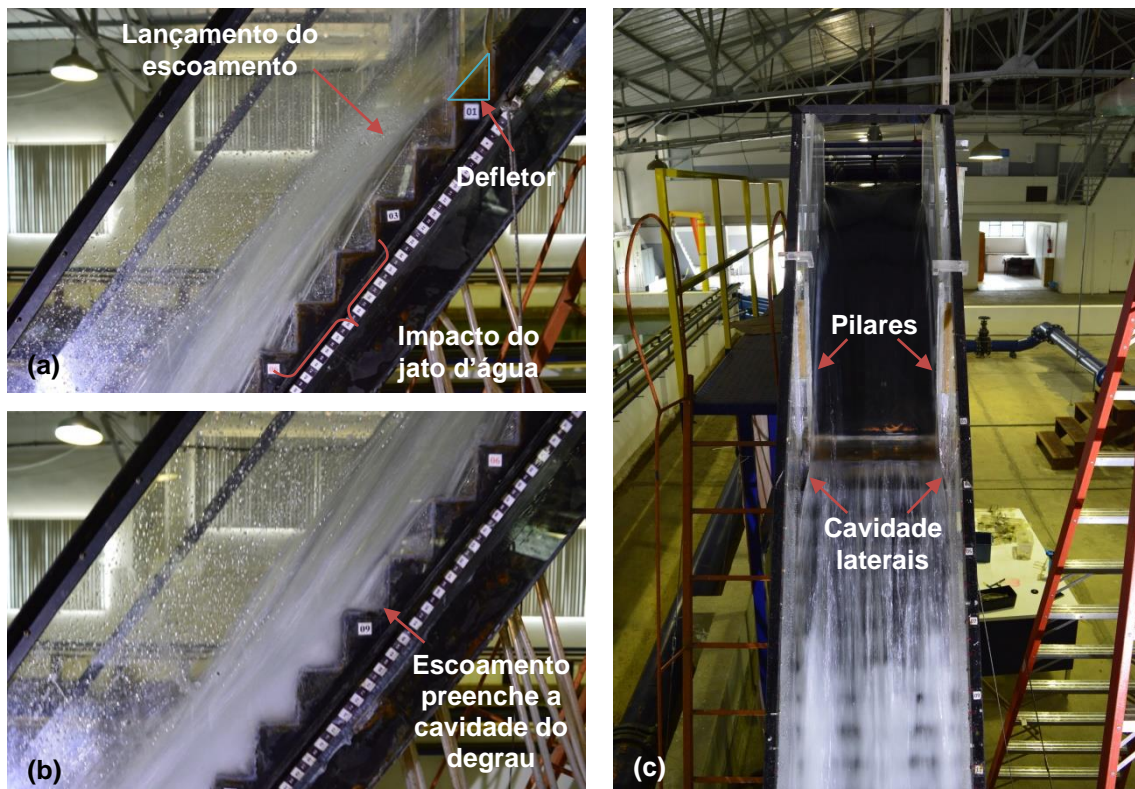


Figura 56 - Visualização do escoamento sobre vertedouro em degraus LOH I com aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para a vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (a) Vista lateral do início da calha em degraus, (b) Vista lateral do centro da calha em degraus e (c) Vista frontal da calha em degraus

Após o lançamento do escoamento sobre os degraus, o escoamento impacta a quina do patamar do degrau 4, no entanto, nos próximos degraus o escoamento não preenche a cavidade dos degraus na sua totalidade, como pode ser visualizado na Figura 56 (b), impactando também a quina dos degraus 5, 6 e 7, de maneira geral, sendo que para as maiores vazões específicas ocorre um maior preenchimento da cavidade destes degraus, pois a massa de água que escoava pelo modelo é maior. Também observou-se a formação de uma cavidade nas laterais, em virtude da presença dos pilares (Figura 56 (c)).

Após o lançamento do escoamento e o impacto do jato d'água nos degraus inicia-se o processo de aeração inferior do escoamento, ou seja, a aeração ocorre apenas na parte inferior do escoamento, na cavidade do degrau, não atingindo toda a altura da lâmina de água (Figura 57 (a) e (c)). Essa região varia conforme a vazão, no entanto, para as vazões específicas ensaiadas ocorreu entre os degraus 8 a 10.

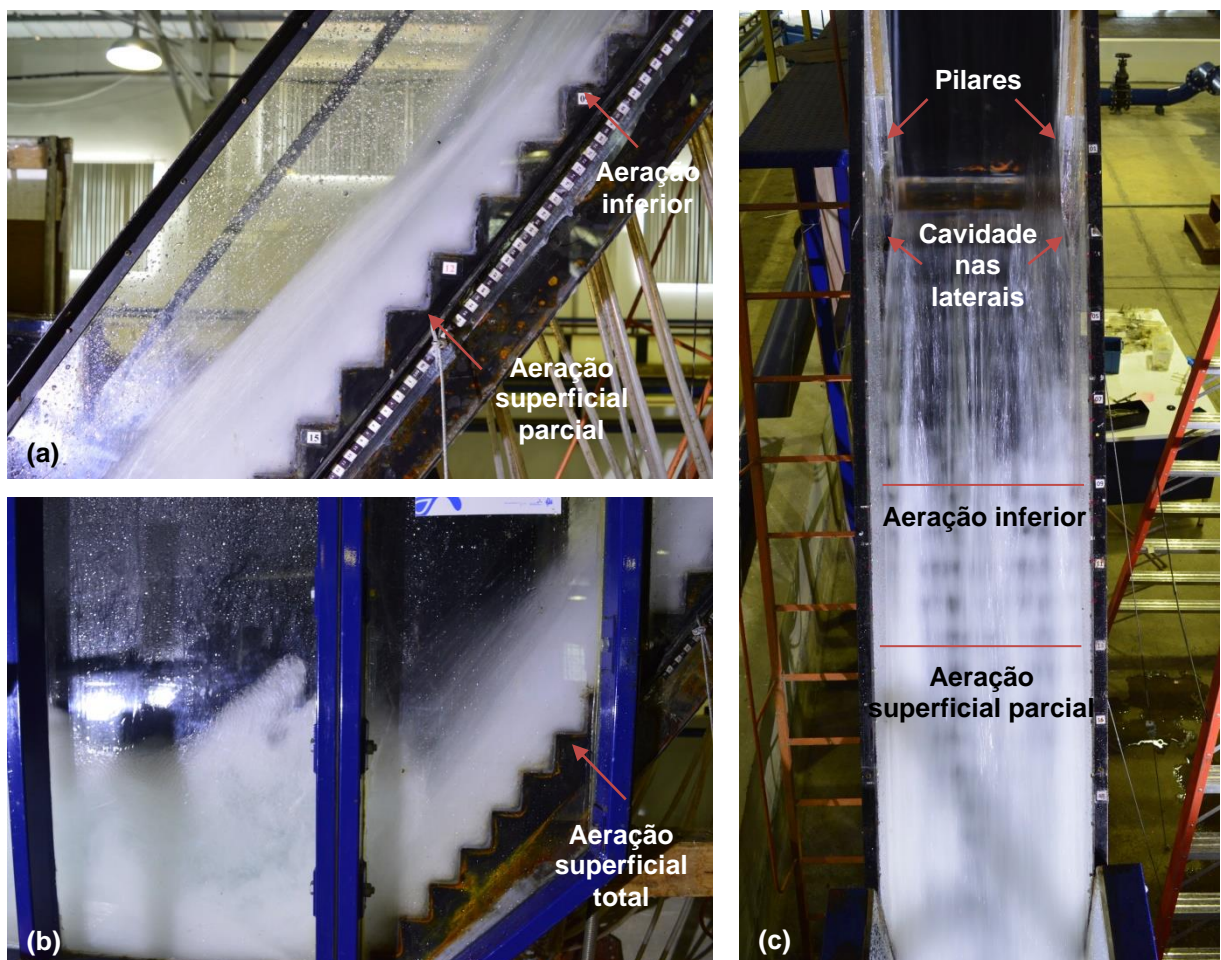


Figura 57 – Visualização da aeração inferior e superior parcial e total do escoamento sobre vertedouro em degraus LOH I com aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para a vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  (a) Vista lateral do centro da calha em degraus, (b) Vista lateral do fim da calha em degraus e (c) Vista frontal da calha em degraus.



A jusante da aeração inferior ocorre a aeração superficial do escoamento, quando toda a lâmina de água está aerada. Essa região pode ser dividida em aeração superficial parcial (Figura 57 (a) e (c)), que ocorre quando as aerações inferior e superior se encontram e a camada limite atinge a superfície livre do escoamento, e em aeração total do escoamento (Figura 57 (b)), que ocorre quando a aeração e a profundidade do escoamento são uniformes, para uma mesma vazão.

#### 4.1.2 Comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As pressões médias registradas nos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 58 em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 58 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

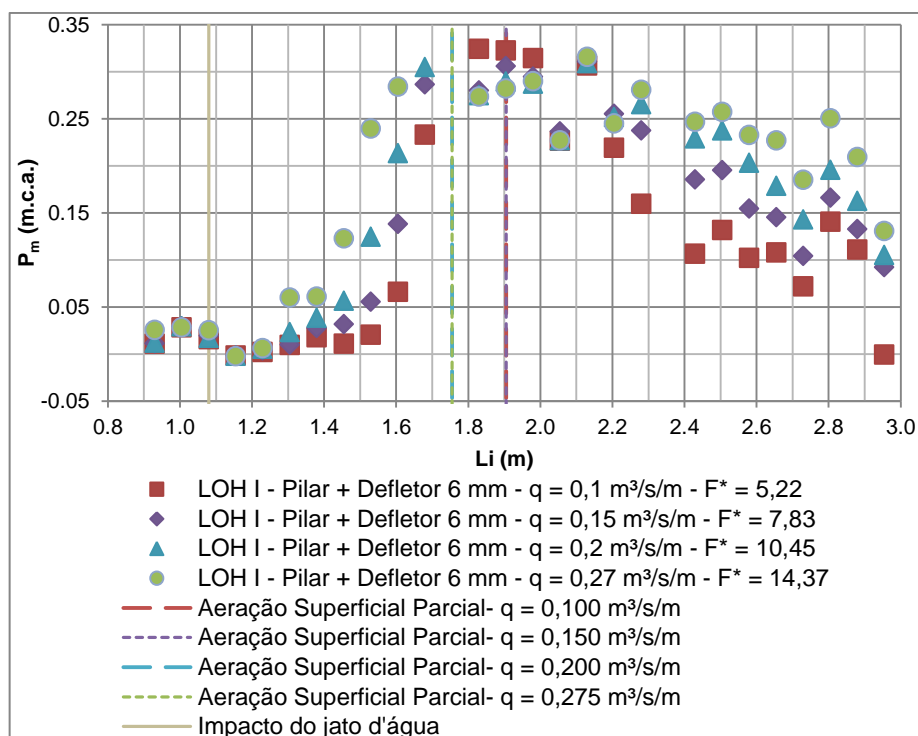


Figura 58 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

Através da análise do comportamento das pressões médias verificadas nos patamares dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm percebe-se que, no início da calha em degraus as cargas de pressões médias apresentam valores próximos de 0 m.c.a.. Esse comportamento ocorre em decorrência do defletor instalado no primeiro degrau, o qual propicia o lançamento do escoamento sobre os degraus, sendo que este comportamento se estende a jusante do impacto do escoamento sobre o patamar do degrau e varia conforme a vazão específica ensaiada, pois é influenciado pelo preenchimento da cavidade do degrau e, está diretamente relacionado com o início da aeração inferior do escoamento.

As cargas de pressões médias para a maior vazão específica ensaiada,  $0,270 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , crescem a partir da posição em torno de 1,23 m, já para a menor vazão específica ensaiada cresce a partir da posição longitudinal em torno de 1,53 m, sendo que os valores de carga de pressão média são próximos entre si, ou seja, sem dispersão significativa entre as vazões.

Os valores máximos de carga de pressão média para todas as vazões foram em torno de 0,30 a 0,35 m.c.a., e os mesmos decresceram logo a jusante da região em que ocorre a aeração da superfície do escoamento, tendendo a estabilidade a partir da posição longitudinal em torno de 2,70 m, região na qual ocorreu a aeração superficial total do escoamento.

A fim de verificar a influência dos pilares + defletor de 6 mm no escoamento ao longo do vertedouro em degraus, o comportamento da pressão média desta configuração foi comparado com o comportamento da aeração natural para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e  $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , que podem ser visualizados na Figura 59 (a), (b), (c) e (d), respectivamente, juntamente com a posição de início de aeração superfície e aeração superficial total para a configuração de aeração natural.

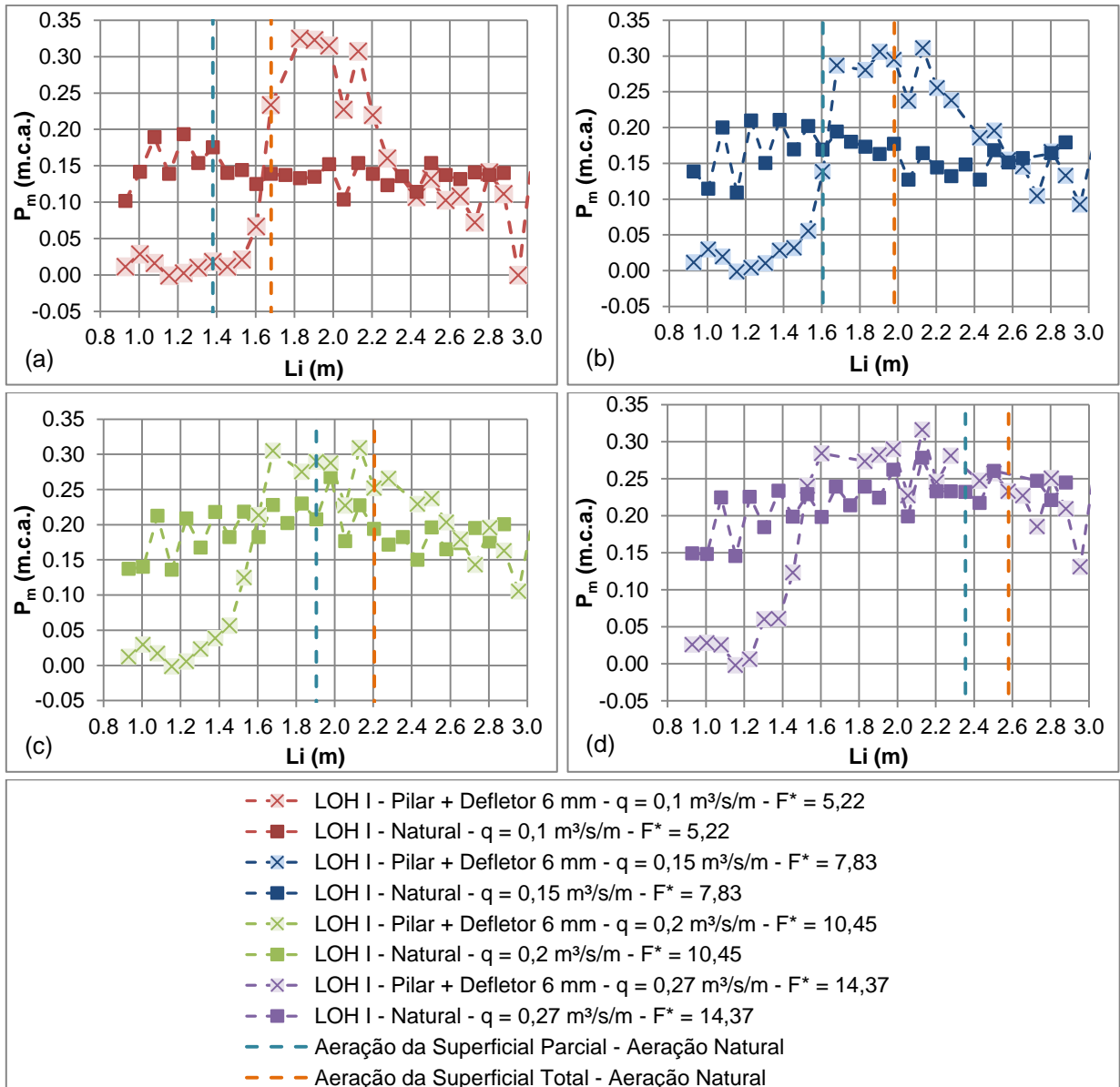


Figura 59 - Comparação da pressão média entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Através da comparação entre as duas configurações, percebe-se que, de maneira geral, no início da calha em degraus as cargas de pressões médias para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm foram inferiores a aeração natural, já o contrário ocorre no centro da calha e no fim da calha em degraus as cargas de pressões médias para as duas configurações apresentam-se próximas.

As cargas de pressões médias para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm foram inferiores a aeração natural no início da calha em degraus, até a posição longitudinal em torno de 1,60 m, pois nesta região ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus e a aeração inferior do escoamento.

Já no centro da calha, aproximadamente na região compreendida entre 1,60 a 2,60 m, as cargas de pressões médias para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm foram superiores a aeração natural, em virtude, da aeração superficial do escoamento, que para a aeração induzida por pilares + defletor 6 mm ocorre mais a jusante, quando comparado à aeração natural, fazendo com que as cargas de pressões médias se elevem nesta região.

A diferença entre as cargas de pressões médias, no centro da calha, para as duas configurações é maior para as vazões específicas de 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, do que para as vazões específicas de 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, pois para as menores vazões específicas a aeração superficial total do escoamento para aeração natural ocorre em torno do centro da calha e, como, aeração do escoamento está totalmente desenvolvida, as cargas de pressões médias são, praticamente, estáveis. A partir da região em que ocorre a aeração superficial total do escoamento para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, as cargas de pressões médias, para as menores vazões específicas, estão próximas as cargas de pressões médias da aeração natural.

Para as maiores vazões específicas, a diferença das cargas de pressões médias para as duas configurações é menor, pois a aeração superficial do escoamento ocorreu em posições longitudinais próximas para as duas configurações, e, com isso, os valores da carga de pressão média também apresentam próximos entre si, até o fim da calha em degraus.

#### **4.1.3 Comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões médias registradas nos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 60, em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 60 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

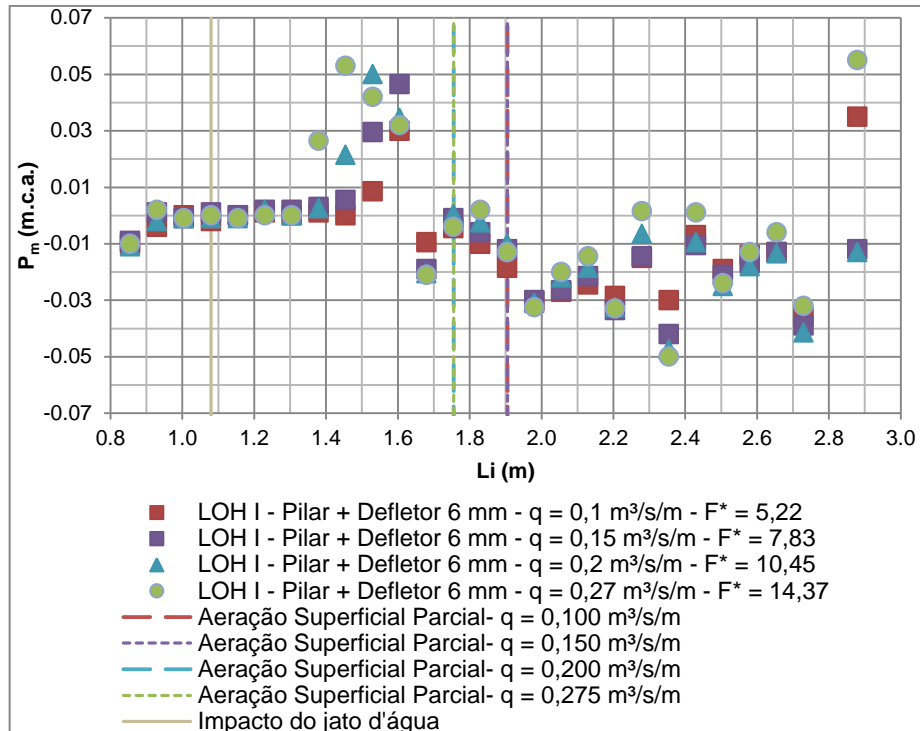


Figura 60 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

A partir da análise do comportamento das pressões médias verificadas nos espelhos dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm percebe-se que as cargas de pressões médias oscilam em torno de -0,05 a 0,05 m.c.a..

As cargas de pressões médias apresentam valores próximos de 0 m.c.a., até a posição longitudinal de 1,40 m, aproximadamente, sem apresentar dispersão significativa entre as vazões específicas. A partir da posição longitudinal de 1,40 m, as cargas de pressões médias crescem, para todas as vazões e, ainda a montante da posição de início de aeração superficial as mesmas decrescem, atingindo valores negativos de carga de pressão média, e, seus valores oscilam até o fim da calha em degraus.

A comparação do comportamento das pressões médias dos espelhos entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I está apresentado na Figura 61 (a), (b), (c) e (d), juntamente com a posição de início de aeração superfície e aeração superficial total para a configuração de aeração natural, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , respectivamente.

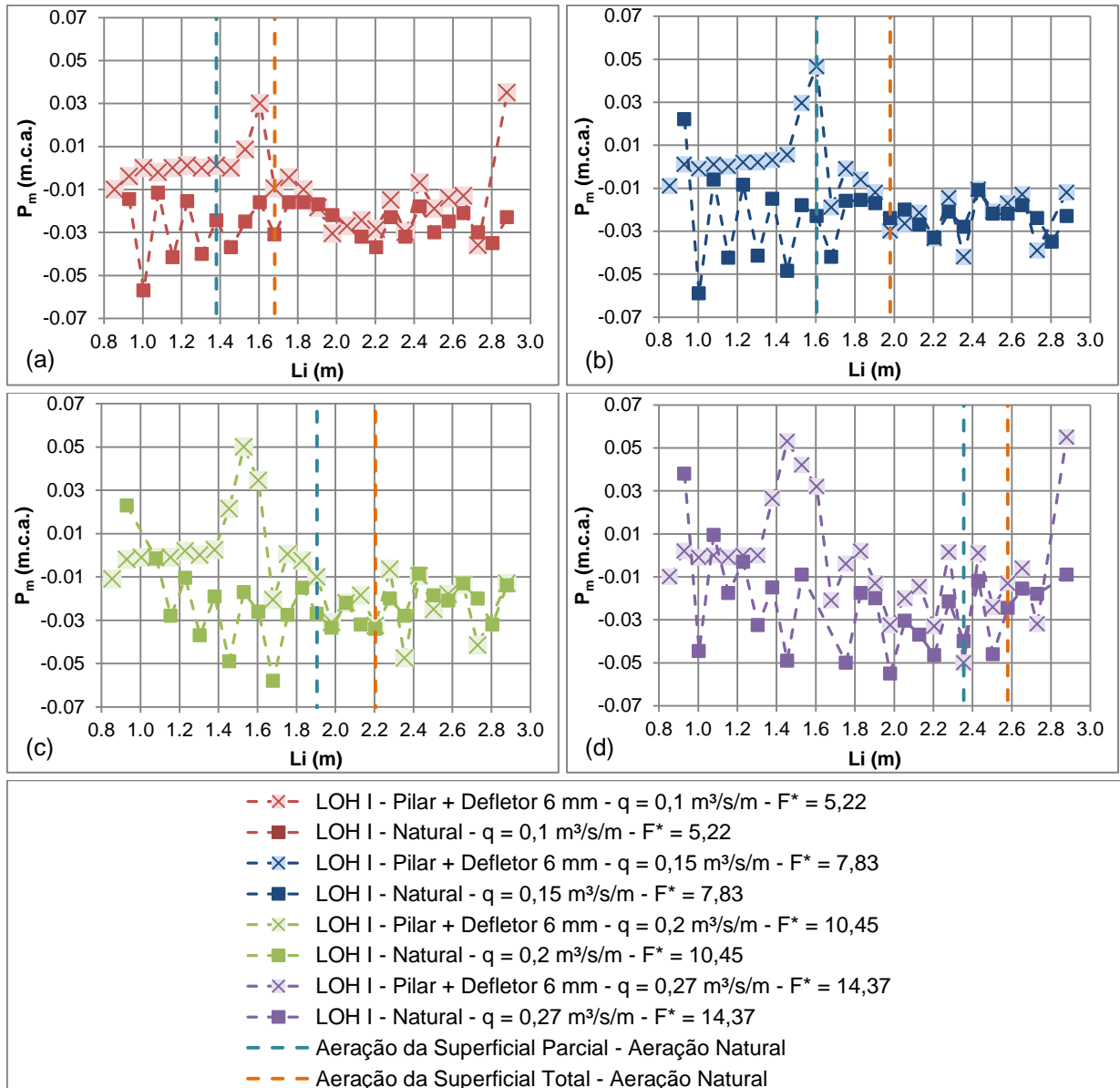


Figura 61 - Comparação da pressão média entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$

Através da comparação das cargas de pressões médias dos espelhos para as duas configurações, verifica-se que para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm os valores foram superiores a aeração natural na região em que ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus e a aeração inferior do escoamento. Onde os valores da aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm aproximam-se de 0 m.c.a., enquanto que a aeração natural apresenta valores negativos de carga de pressão média.

A jusante os valores de carga de pressão média do espelho, para as duas configurações se aproximam, no entanto, os valores para a aeração induzida por

pilares + defletor de 6 mm, ainda são superiores, sendo que, somente, a partir da posição em que o escoamento para as duas configurações está aerado é que as cargas de pressões apresentam valores praticamente iguais. Isso pode ser visualizado com mais clareza observando o comportamento das cargas de pressões para as vazões específicas de 0,150 e 0,200 m<sup>3</sup>/s/m (Figura 61 (b) e (c)).

#### 4.1.4 Comportamento das pressões flutuantes dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As flutuações de pressões registradas nos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 62, em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 62 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

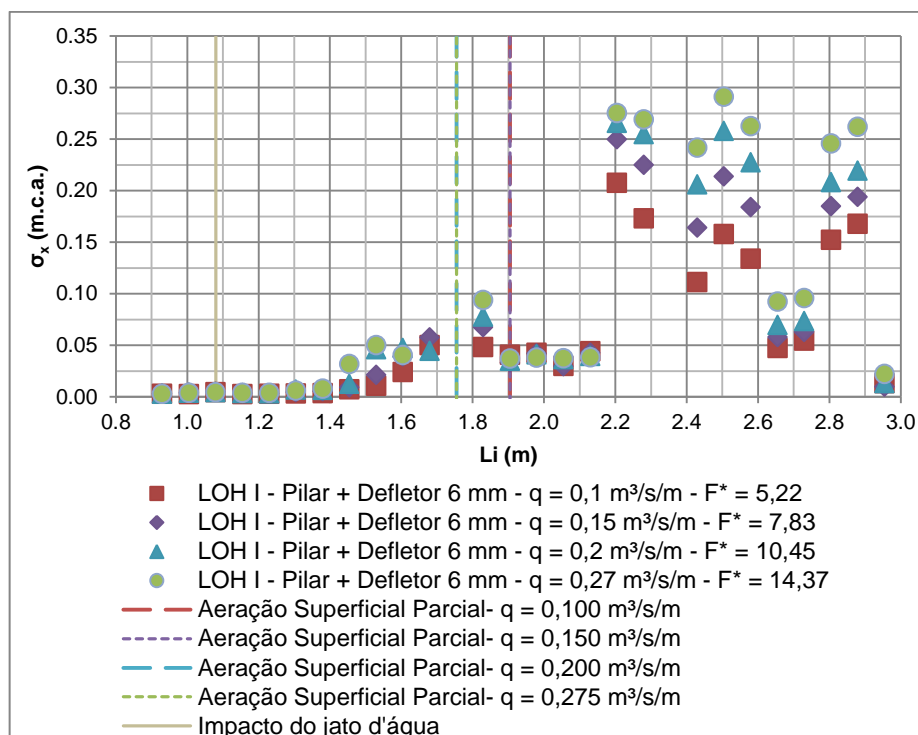


Figura 62 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

As cargas de flutuações de pressões dos patamares para a aeração induzida por pilares apresentam valores próximos de 0 m.c.a. até a posição longitudinal em torno de 1,40 m, para todas as vazões específicas ensaiadas, sendo que a partir desta posição as cargas de flutuações de pressões crescem até o valor em torno de 0,05 m.c.a., permanecendo, praticamente, estáveis até a posição longitudinal em torno de 2,10 m, também, para todas as vazões específicas ensaiadas.

A partir da posição longitudinal de 2,10 m, a jusante da posição de início da aeração superficial, as cargas de flutuações de pressões cresceram, permanecendo praticamente estáveis, em torno de um valor, para cada vazão específica ensaiada, até o fim da calha em degraus. Conforme a vazão específica aumenta as cargas de flutuações de pressões nesta região se elevaram, sendo que para a vazão específica de 0,275 m<sup>3</sup>/s/m a carga de flutuação de pressão apresentou-se em torno de 0,25 m.c.a.

A comparação das flutuações de pressões dos patamares entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I, está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, na Figura 63 (a), (b), (c) e (d), juntamente com a posição de início de aeração superfície e aeração superficial total para a configuração de aeração natural.



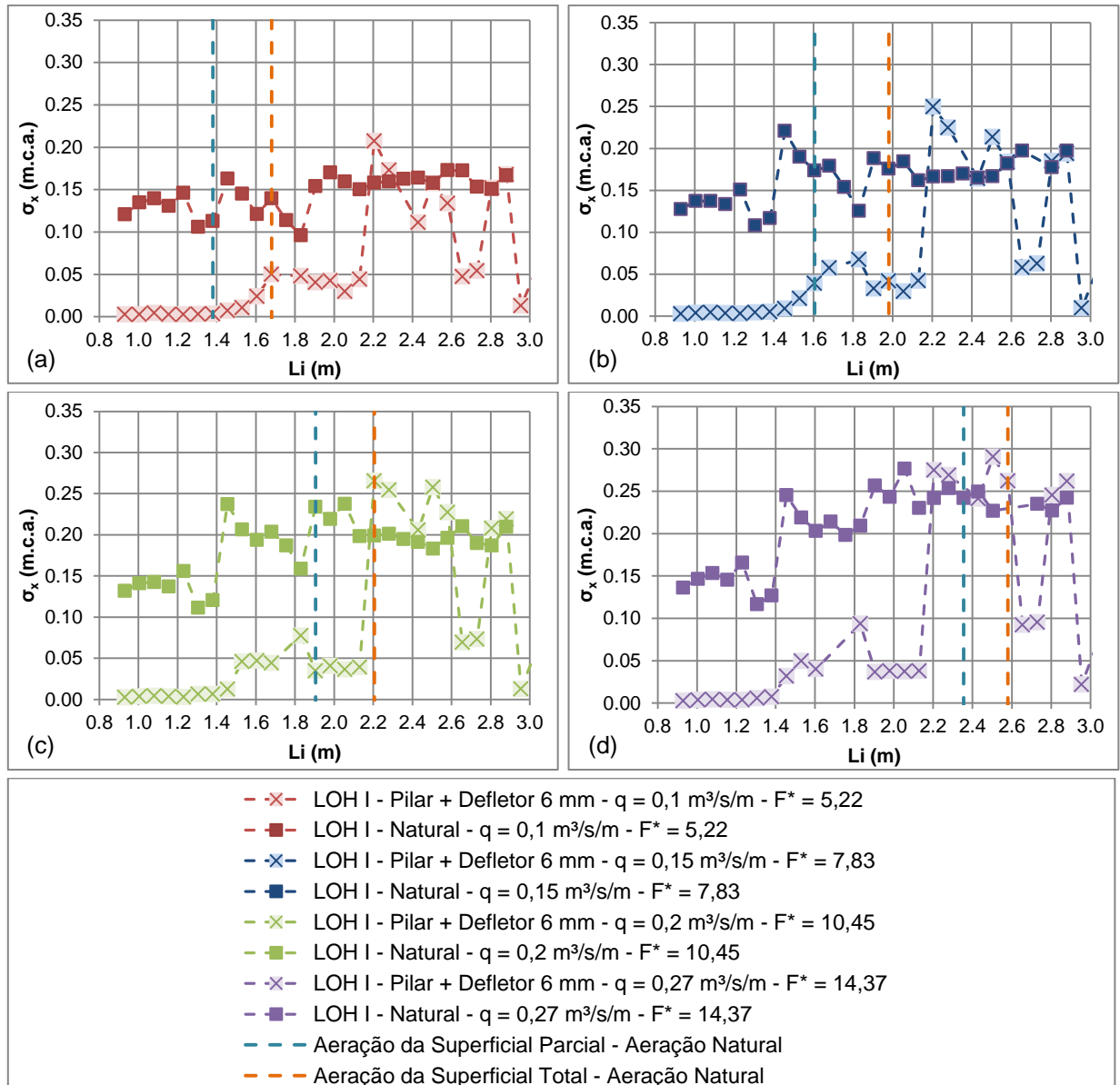


Figura 63 - Comparação da flutuação de pressão entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$

Através da comparação das cargas de flutuações de pressões entre as duas configurações ensaiadas, percebe-se que, independentemente da vazão específica, a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, apresentou valores de carga de flutuação de pressão inferiores a aeração natural em torno de 0,15 a 0,20 m.c.a., até a posição longitudinal em torno de 2,10 m. E a partir da mesma as cargas de flutuações de pressões de ambos os modelos foram semelhantes, embora, em alguns pontos, a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm apresentaram-se superiores e até inferiores a aeração natural.

#### 4.1.5 Comportamento das pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As flutuações de pressões registradas nos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 64, em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 64 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

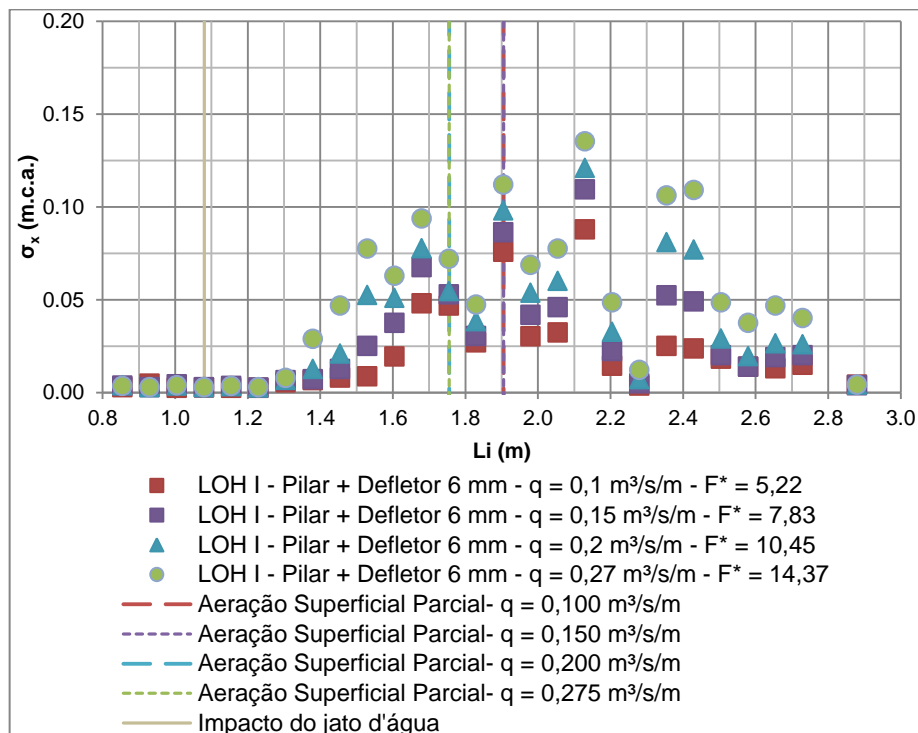


Figura 64 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

A partir da análise do comportamento das flutuações de pressões verificadas nos espelhos dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm percebe-se que, da mesma forma que ocorre para os patamares, os espelhos apresentam cargas de flutuações de pressões próximos de 0 m.c.a, até a posição longitudinal em torno de 1,40 m, em virtude do lançamento do escoamento sobre os degraus e da aeração inferior do escoamento. Após a posição longitudinal em torno de 1,40 m as cargas de flutuações de pressões dos espelhos crescem e

atingem valores máximos, para todas as vazões específicas, na posição longitudinal em torno de 2,10 m, a jusante da posição de início de aeração superficial, e, após as cargas de flutuações de pressões decrescem até o fim da calha em degraus.

A comparação das flutuações de pressões dos espelhos entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I, está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, na Figura 65 (a), (b), (c) e (d), juntamente com a posição de início de aeração superfície e aeração superficial total para a configuração de aeração natural.

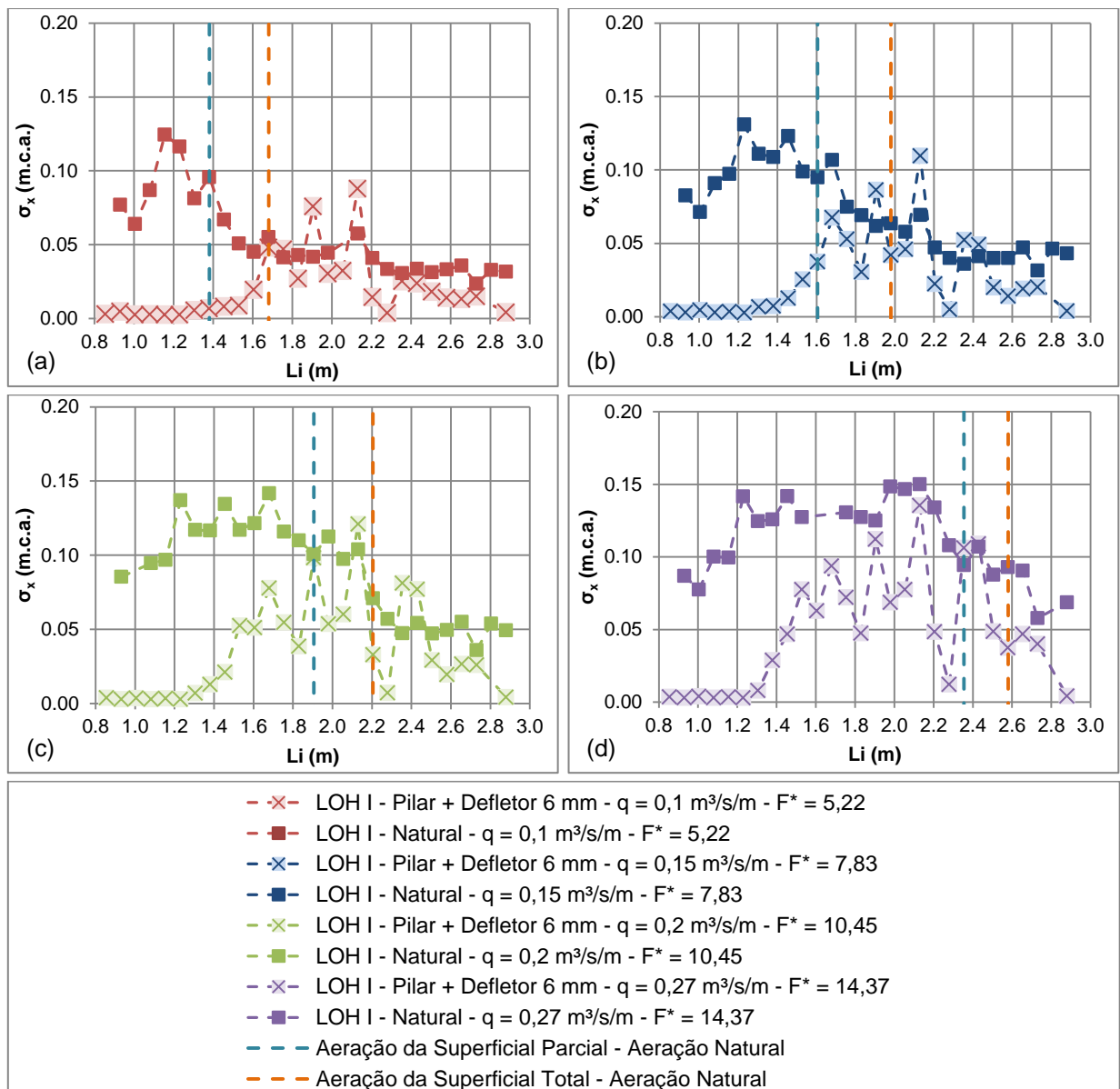


Figura 65 - Comparação da flutuação de pressão entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

A partir da comparação das cargas de flutuações de pressões dos espelhos entre as duas configurações ensaiadas, verifica-se que a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm apresentou valores de carga de flutuação de pressão inferiores a aeração natural até a posição em que para as duas configurações a aeração está desenvolvida, ou seja, até a posição em que inicia, para a aeração natural, a aeração superficial total do escoamento, pois como a aeração do escoamento está totalmente desenvolvida, as cargas de flutuações de pressões apresenta-se estáveis para ambas as configurações.

#### **4.1.6 Comportamento das pressões extremas dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, representando as pressões mínimas, e 99,0% e 99,9%, representando as pressões máximas, dos patamares e espelhos, que estão apresentadas na Figura 66 a na Figura 77, ocorrem durante uma pequena parcela de tempo, no entanto, permitem que se tenha uma estimativa dos valores mínimos e máximos que as pressões podem atingir, conforme explica Lopardo (1986).

##### **4.1.6.1 Comportamento das pressões extremas mínimas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% registradas nos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 66 (a) e (b), em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 66 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

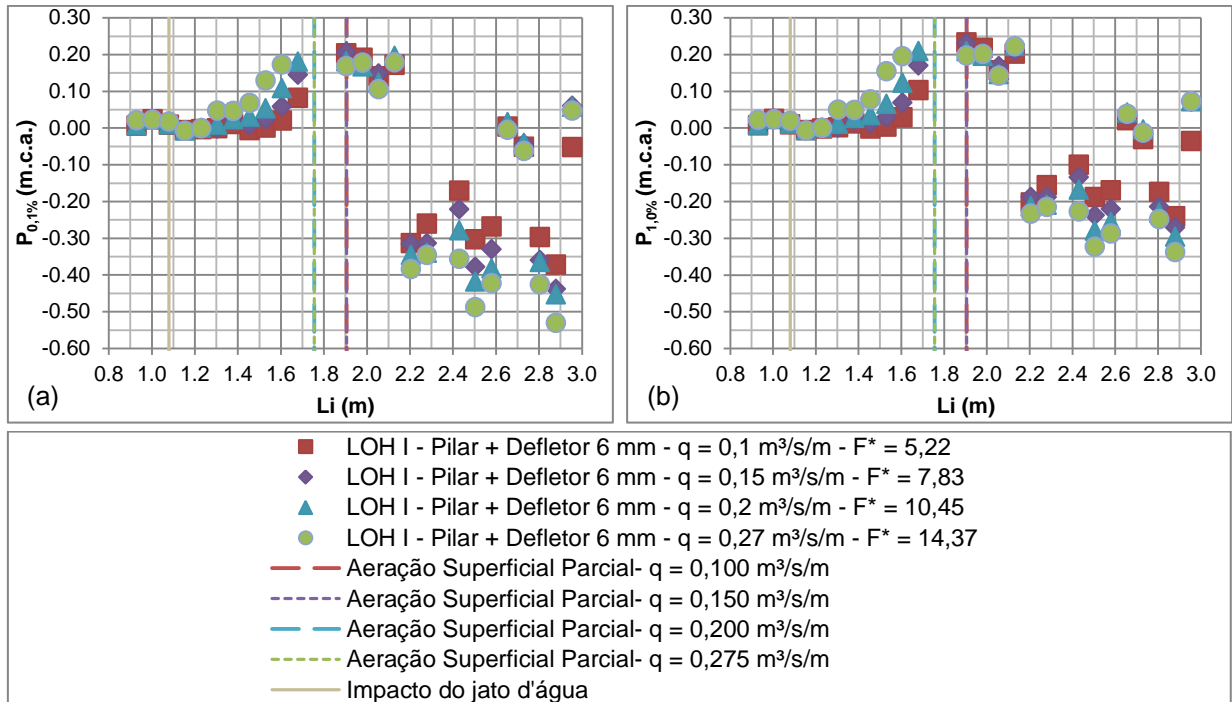


Figura 66 - Comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de (a) 0,1% e (b) 1,0% para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

A partir da análise do comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% verificadas nos patamares dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, percebe-se que o comportamento de ambas probabilidades é similar, no entanto, os valores de carga de pressão associada à probabilidade de não-excedência de 0,1% são inferiores.

As cargas de pressões extremas mínimas são próximas de 0 m.c.a. para todas as vazões específicas ensaiadas, até a posição longitudinal em torno de 1,25 m, para a maior vazão específica ensaiada e, 1,53 m, para a menor vazão específica ensaiada, ou seja, na região em que ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus. A partir desta posição as cargas pressões mínimas crescem, atingindo, para a maior vazão específica, valores em torno de 0,20 e 0,25 m.c.a., para as pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, respectivamente.

A jusante da posição de início da aeração superficial, as cargas de pressões extremas mínimas decrescem e atingem valores negativos, em torno de -0,55 e -0,35 m.c.a., para as pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, respectivamente e maior vazão específica. E a

partir da posição de início da aeração superficial total do escoamento alguns patamares apresentaram cargas de pressões mínimas próximas de 0 m.c.a..

A comparação das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos patamares dos degraus entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I, estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, na Figura 67 (a), (b), (c) e (d) e Figura 68 (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

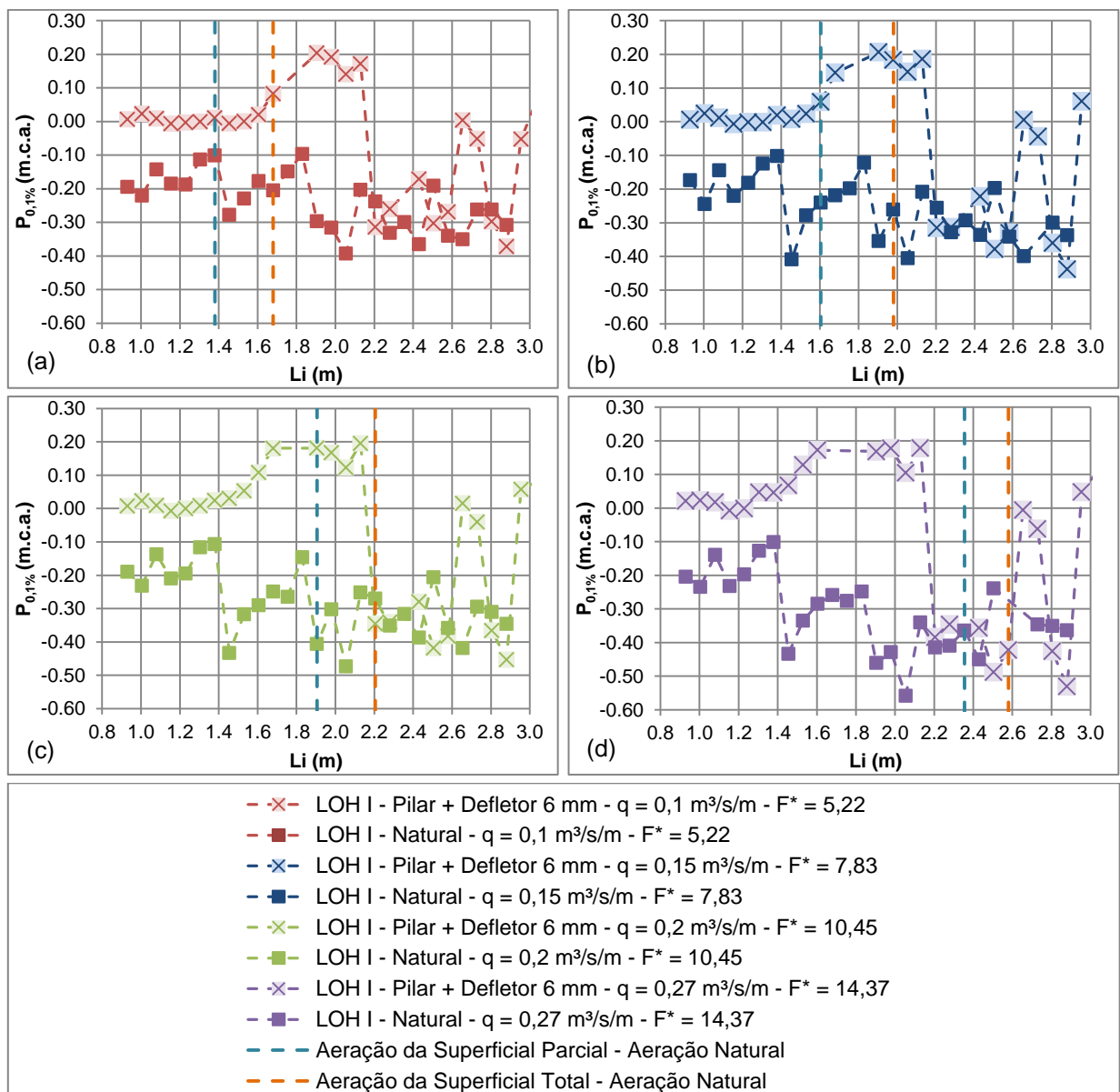


Figura 67 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

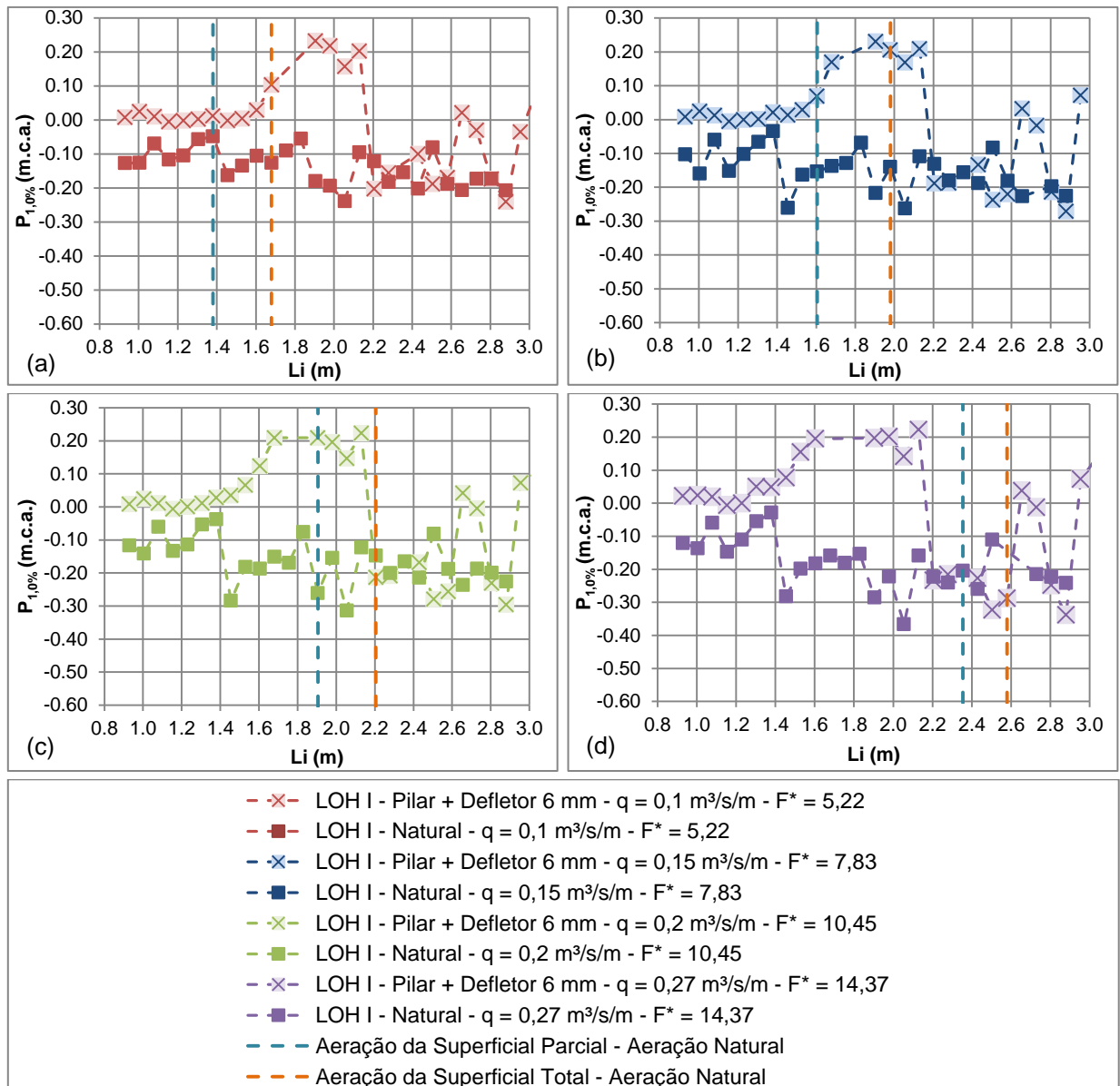


Figura 68 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 1,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Através da análise da comparação das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos patamares para as duas configurações, verifica-se que a aeração induzida por pilares + defletor 6 mm apresentam valores superiores de carga de pressão extrema mínima até a posição longitudinal em torno de 2,13 m, independentemente da vazão específica, e, a partir da mesma os valores de carga de pressão mínima se aproximam para ambas configurações de ensaio.

#### 4.1.6.2 Comportamento das pressões extremas máximas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% registradas nos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 69 (a) e (b), em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 69 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

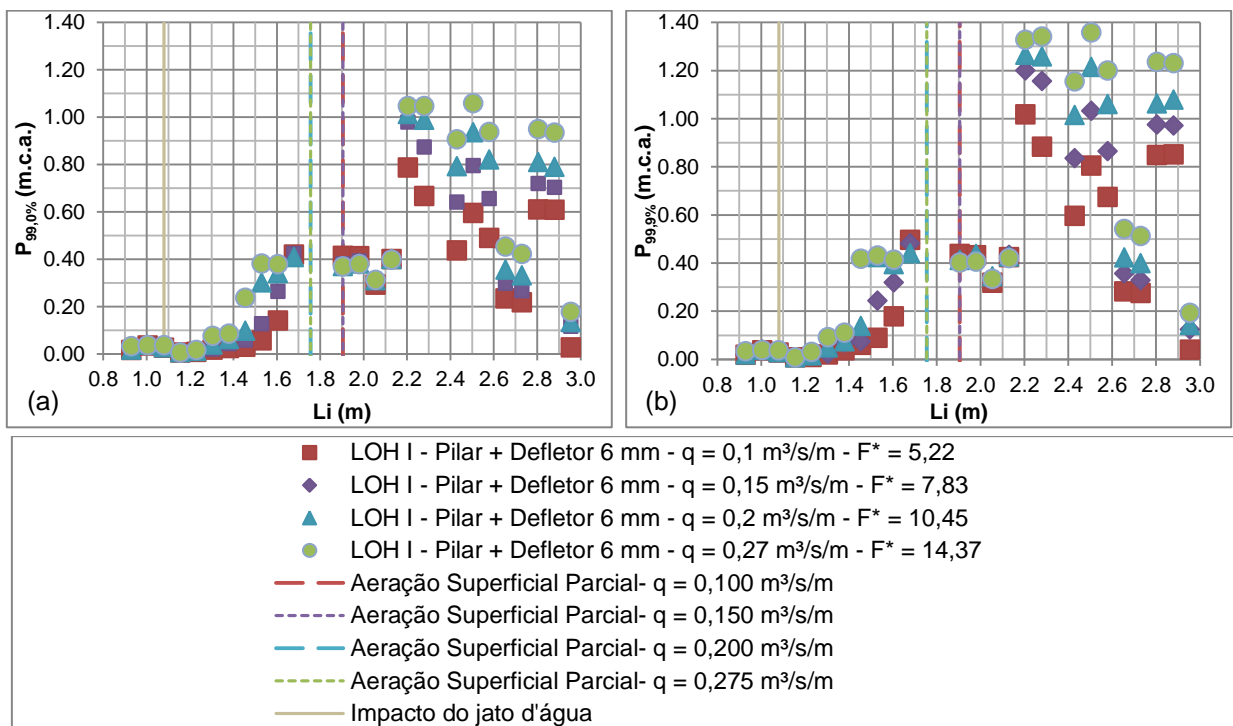


Figura 69 - Comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de (a) 99,0% e (b) 99,9% para os patamares dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

O comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% verificadas nos patamares dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm é similar, embora, os valores da pressão extrema máxima associada à probabilidade de não-excedência de 99,9% apresentam-se superiores.



A partir da análise do comportamento, verifica-se que na região em que ocorre o lançamento do escoamento, até a posição longitudinal em torno de 1,25 m, para a maior vazão específica ensaiada, e, 1,53 m, para a menor vazão específica ensaiada, ou seja, na região em que ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus as cargas de pressões extremas máximas são próximas de 0 m.c.a. e, a partir destas posições as cargas pressões máximas crescem até a posição longitudinal em torno de 2,20 m, atingindo, para a maior vazão específica, valores máximos em torno de 1,00 e 1,40 m.c.a., para as pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9%, respectivamente.

Após a posição longitudinal de 2,20 m, as cargas de pressões máximas decrescem até o fim da calha em degraus, sendo que conforme a vazão específica aumenta o decréscimo é mais suave.

A comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% dos patamares dos degraus entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I, estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, na Figura 70 (a), (b), (c) e (d) e na Figura 71 (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

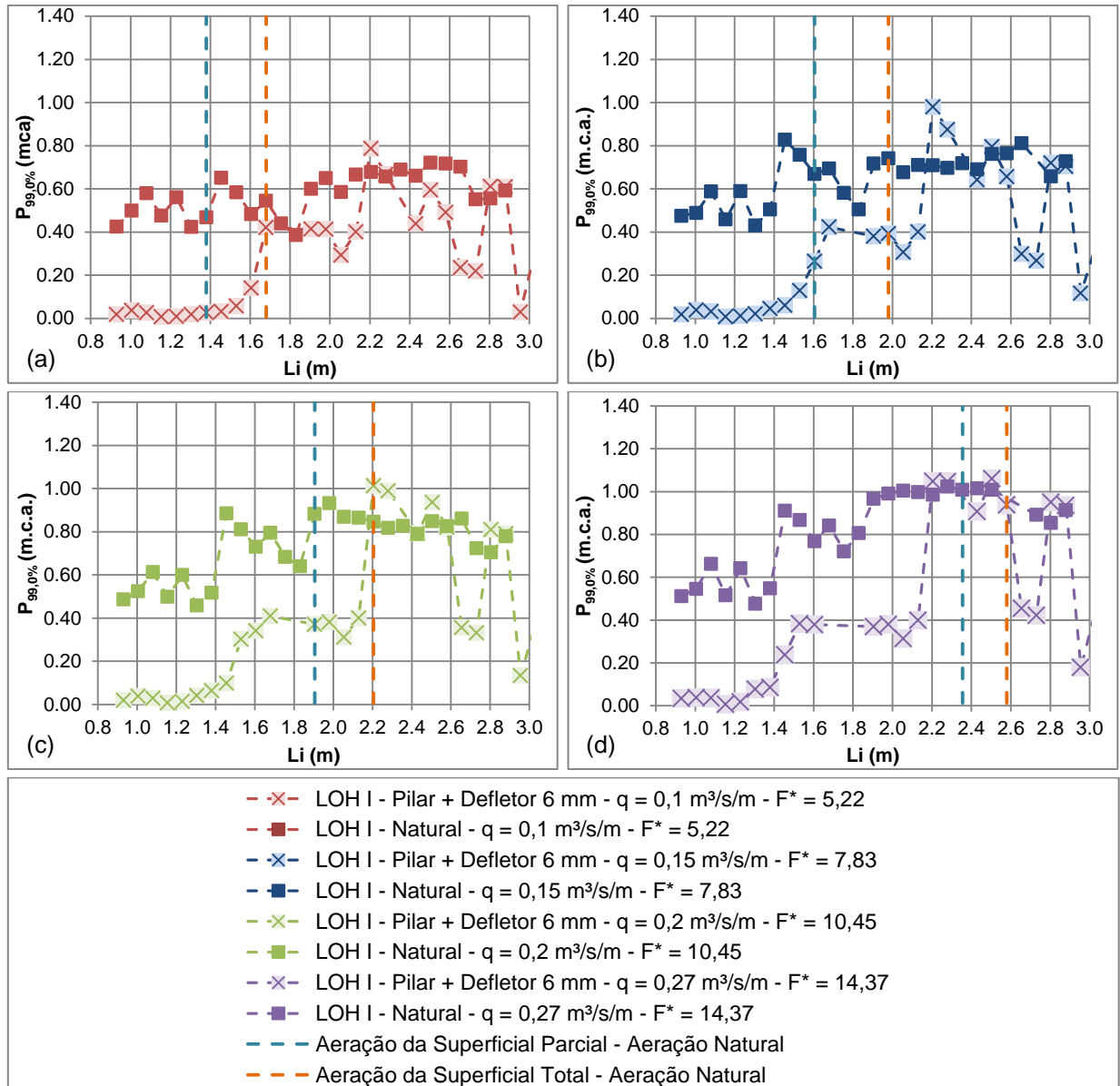


Figura 70 - Comparação das pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

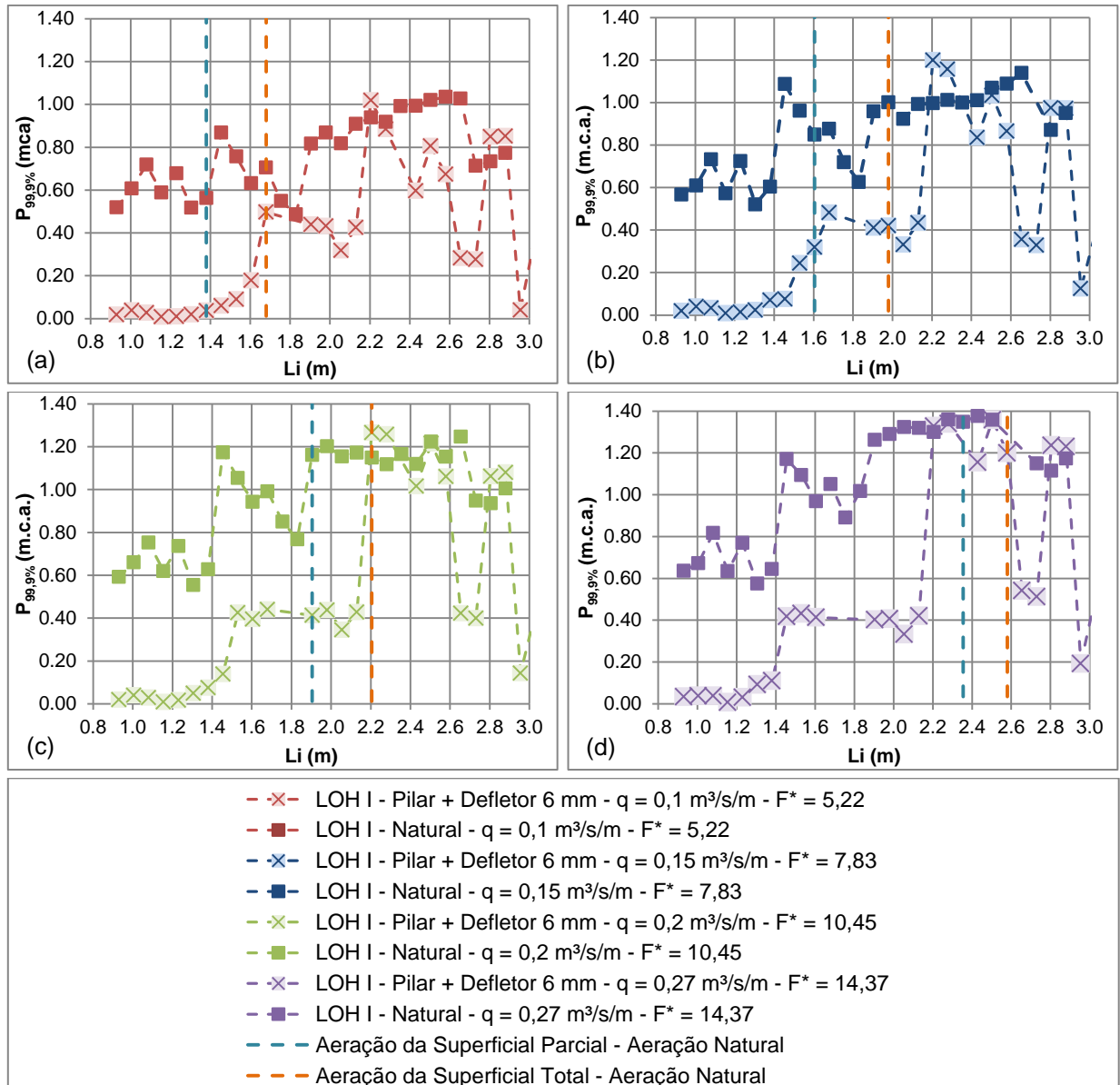


Figura 71 - Comparação das pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os patamares dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$

A partir da comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% dos patamares para as duas configurações, verifica-se que, até a posição longitudinal em torno de 2,13 m, a aeração induzida por pilares + defletor 6 mm apresentam valores inferiores de carga de pressão extrema máxima.

E independentemente da vazão específica, a partir da posição longitudinal em torno de 2,13 m, a jusante da posição de início de aeração, os valores da carga de pressão extrema máxima da aeração induzida por pilares + defletor 6 mm

criaram, e, aproximaram-se dos valores da aeração natural, com alguns patamares apresentando valores inferiores e outros superiores.

#### 4.1.6.3 Comportamento das pressões extremas mínimas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% registradas nos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 72 (a) e (b), em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 72 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

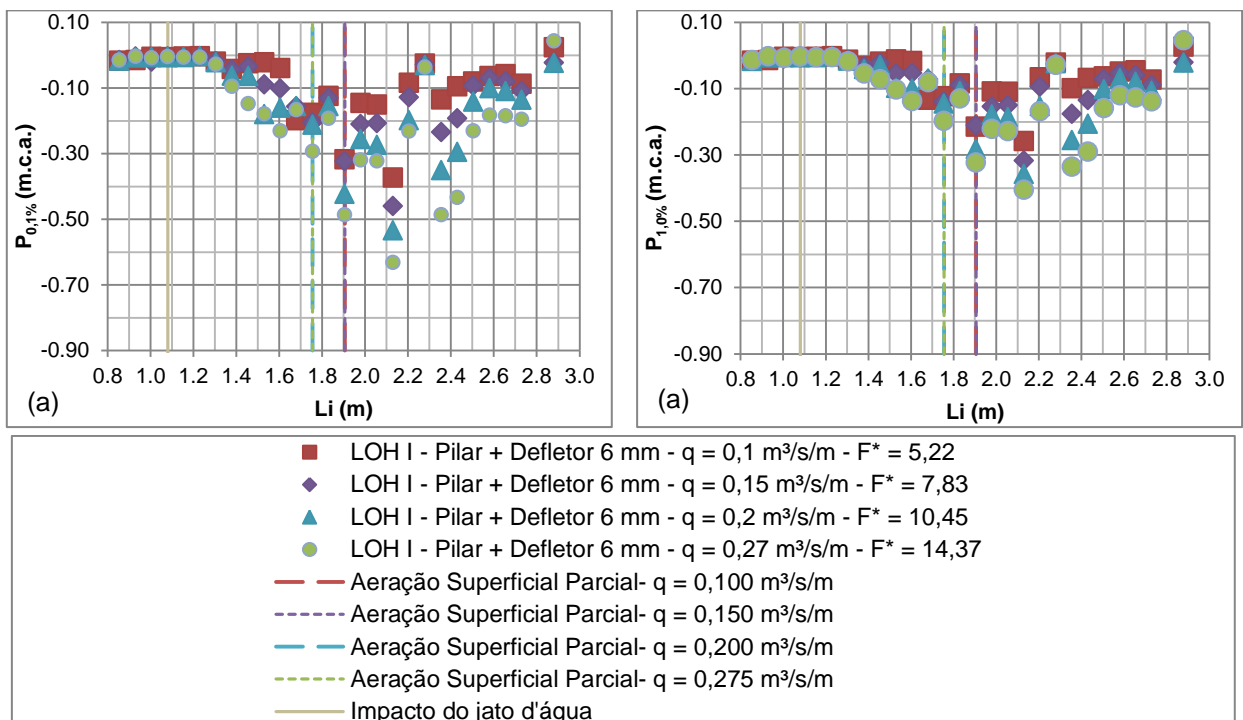


Figura 72 - Comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de (a) 0,1% e (b) 1,0% para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

Através da análise do comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% verificadas nos

espelhos dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, percebe-se que o comportamento de ambas as probabilidades é semelhante, no entanto, as pressões associada à probabilidade de não-excedência de 0,1% apresentam valores mais extremos.

As cargas de pressões extremas mínimas são próximas de 0 m.c.a., até a posição longitudinal em torno de 1,25 m, para a maior vazão específica ensaiada, e, 1,53 m, para a menor vazão específica ensaiada, ou seja, na região em que ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus. A partir desta posição longitudinal as cargas de pressões mínimas decrescem, até a posição longitudinal em torno de 2,13 m, a jusante da posição de início de aeração superficial, onde atingiu valores mínimos de carga de pressão para todas as vazões específicas, sendo que para a maior vazão específica ensaiada os valores foram em torno de -0,65 e -0,40 m.c.a., para as probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, respectivamente.

A partir da posição longitudinal de 2,13 m, as cargas de pressões extremas mínimas crescem, aproximando-se de 0 m.c.a., até o fim da calha em degraus.

A comparação das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos espelhos dos degraus entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I, estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, na Figura 73 (a), (b), (c) e (d) e na Figura 74 (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

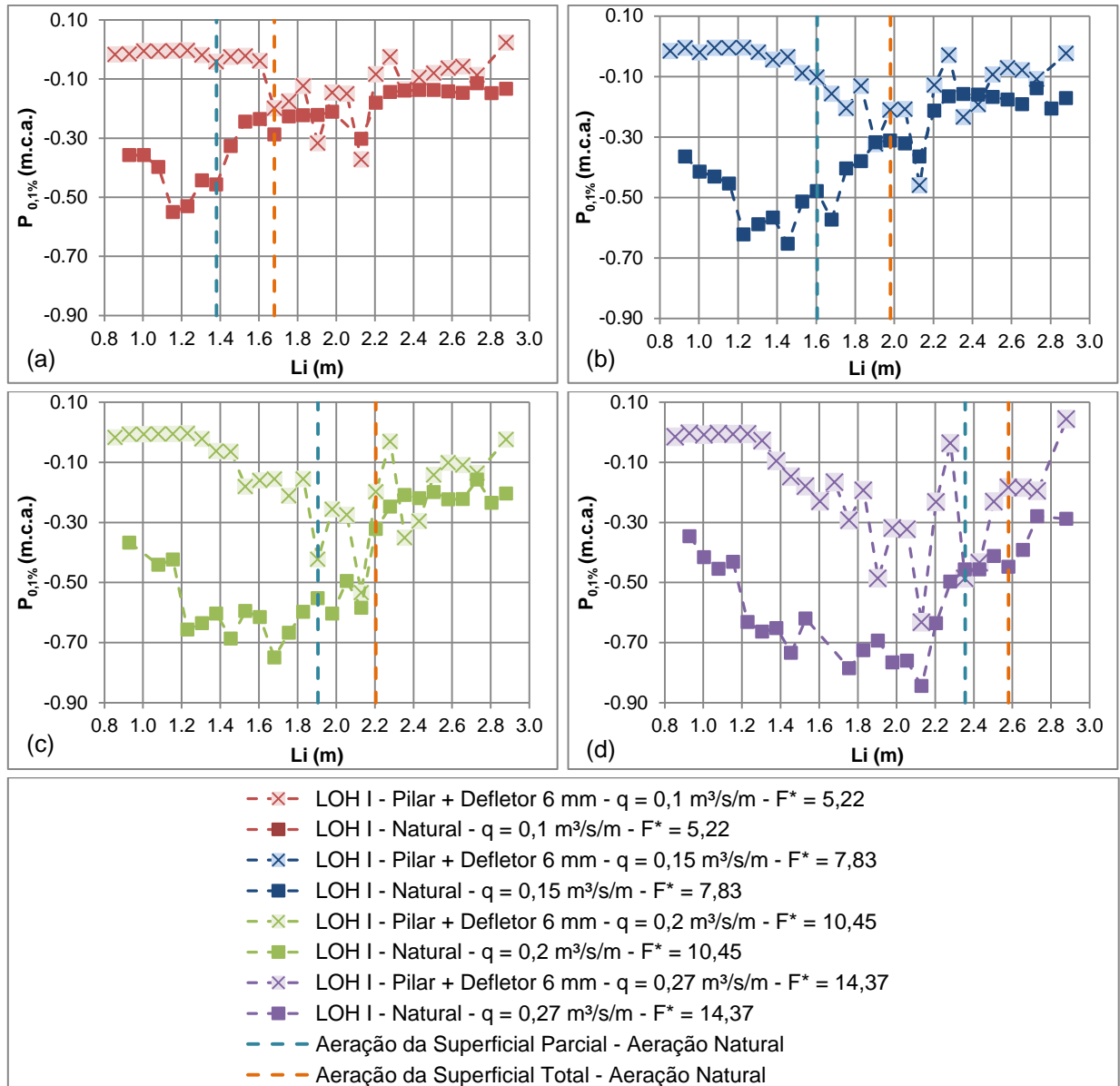


Figura 73 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s/m}$

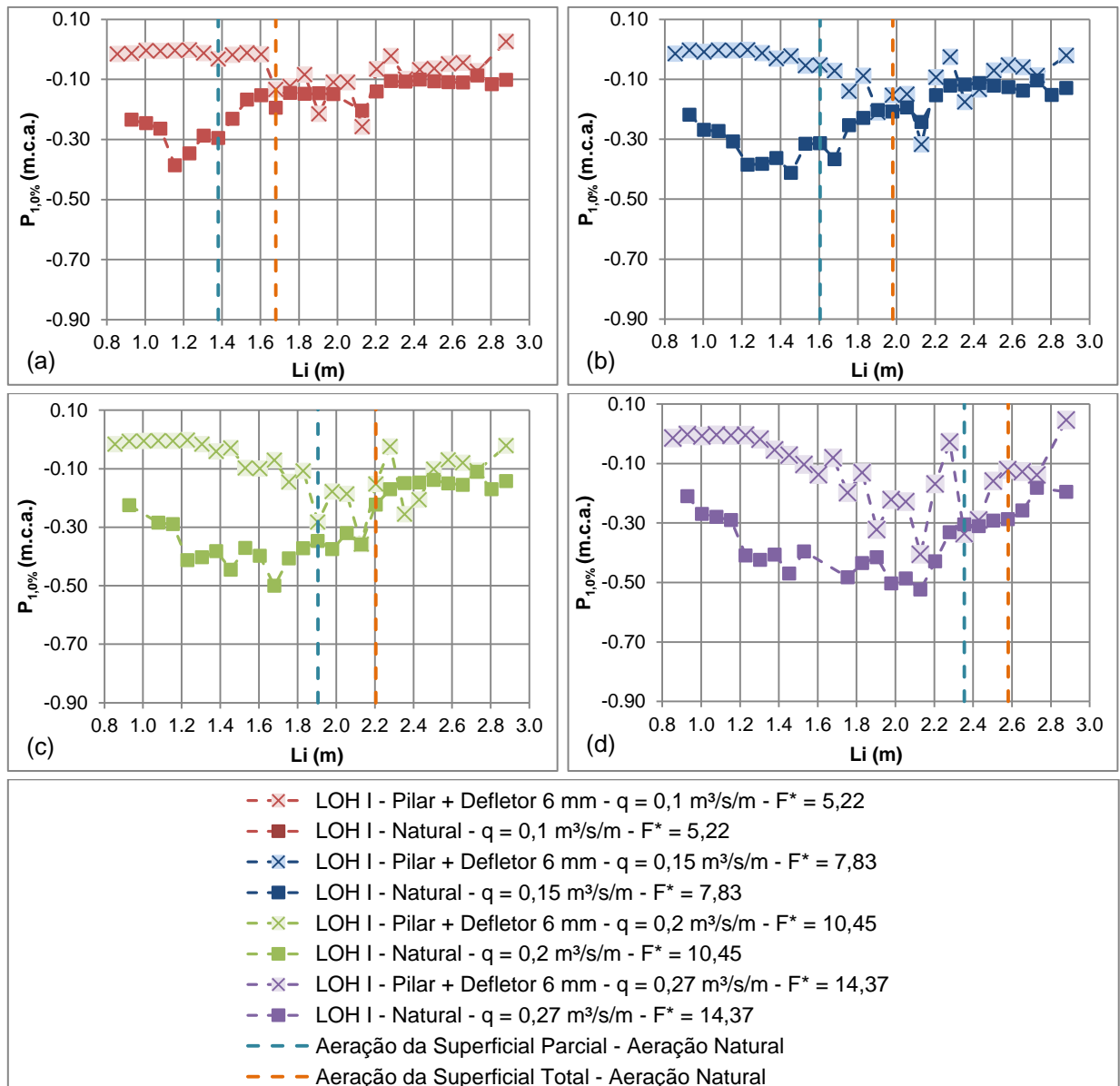


Figura 74 - Comparação das pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 1,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

A partir da comparação das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos espelhos para as duas configurações, verifica-se que, de maneira geral, as cargas de pressões mínimas são semelhantes para as duas configurações a partir da posição em que ocorre a aeração superficial total do escoamento para a aeração natural, ou seja, quando a aeração do escoamento está totalmente desenvolvida e a quantidade de ar incorporado ao escoamento é a mesma para duas configurações. E a montante desta posição, na região em que ocorre o lançamento do escoamento e a aeração

inferior do escoamento, a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm apresenta valores de carga de pressão mínima superiores a aeração natural.

#### 4.1.6.4 Comportamento das pressões extremas máximas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% registradas nos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro do modelo LOH I, para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm estão apresentadas na Figura 75 (a) e (b), em função da vazão ensaiada, pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro. Na Figura 75 também estão apresentadas a posição de impacto do jato d'água e a posição de início de aeração superficial do escoamento obtida visualmente para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm.

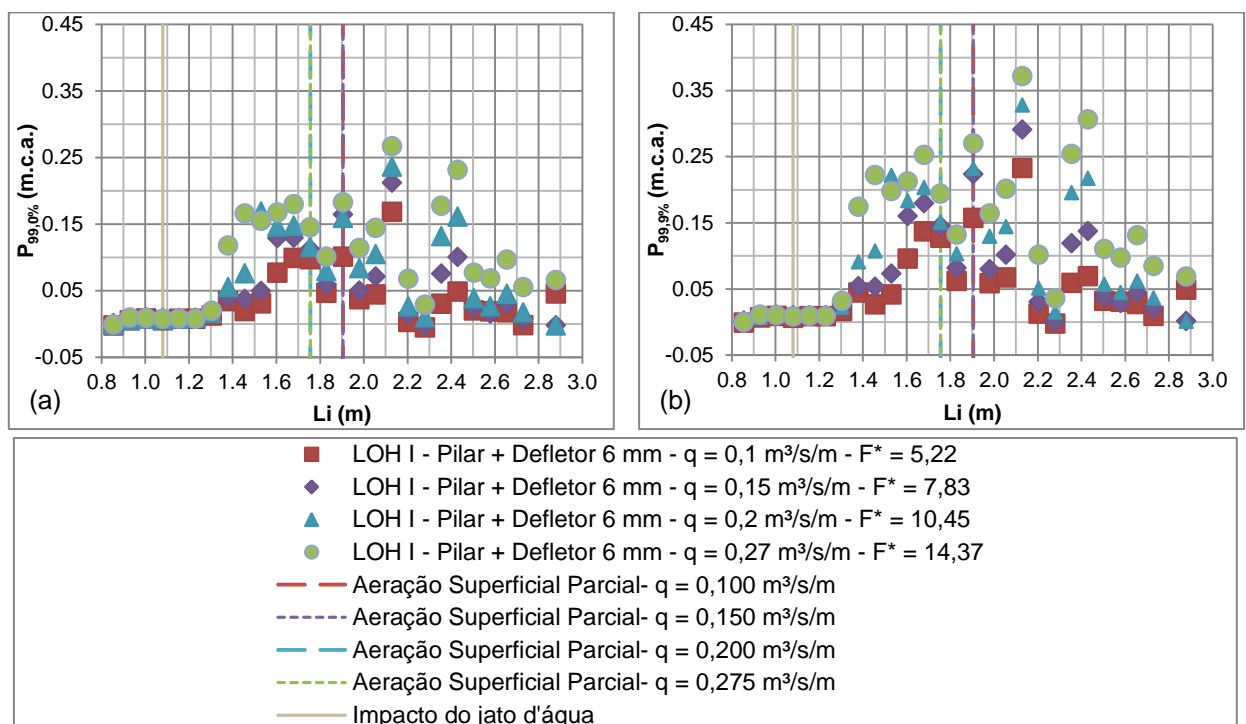


Figura 75 - Comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de (a) 99,0% e (b) 99,9% para os espelhos dos degraus para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, modelo LOH I

Através da análise do comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% verificadas nos



espelhos dos degraus ao longo do vertedouro para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, verifica-se que o comportamento de ambas as probabilidades é similar, porém, as pressões associada à probabilidade de não-excedência de 99,9% apresentam valores mais extremos, ou seja, maiores cargas de pressão máxima.

No início da calha em degraus até a posição em torno de 1,25 m, para a maior vazão específica ensaiada e, 1,53 m, para a menor vazão específica ensaiada, ou seja, na região em que ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus, as cargas de pressões apresentam valores próximos de 0 m.c.a., após os valores crescem até a posição longitudinal em torno de 2,13 m e decrescem, no entanto, os valores apresentam-se dispersos.

Para todas as vazões específicas ensaiadas, na posição longitudinal de 2,13 m, as cargas de pressões máximas atingem seus valores máximos, sendo que para a maior vazão específica os valores apresentam-se em torno de 0,27 e 0,37 m.c.a., para as probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9%, respectivamente.

A comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% dos espelhos dos degraus entre a aeração natural e a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, para o modelo do LOH I, estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, na Figura 76 (a), (b), (c) e (d) e na Figura 77 (a), (b), (c) e (d), respectivamente.

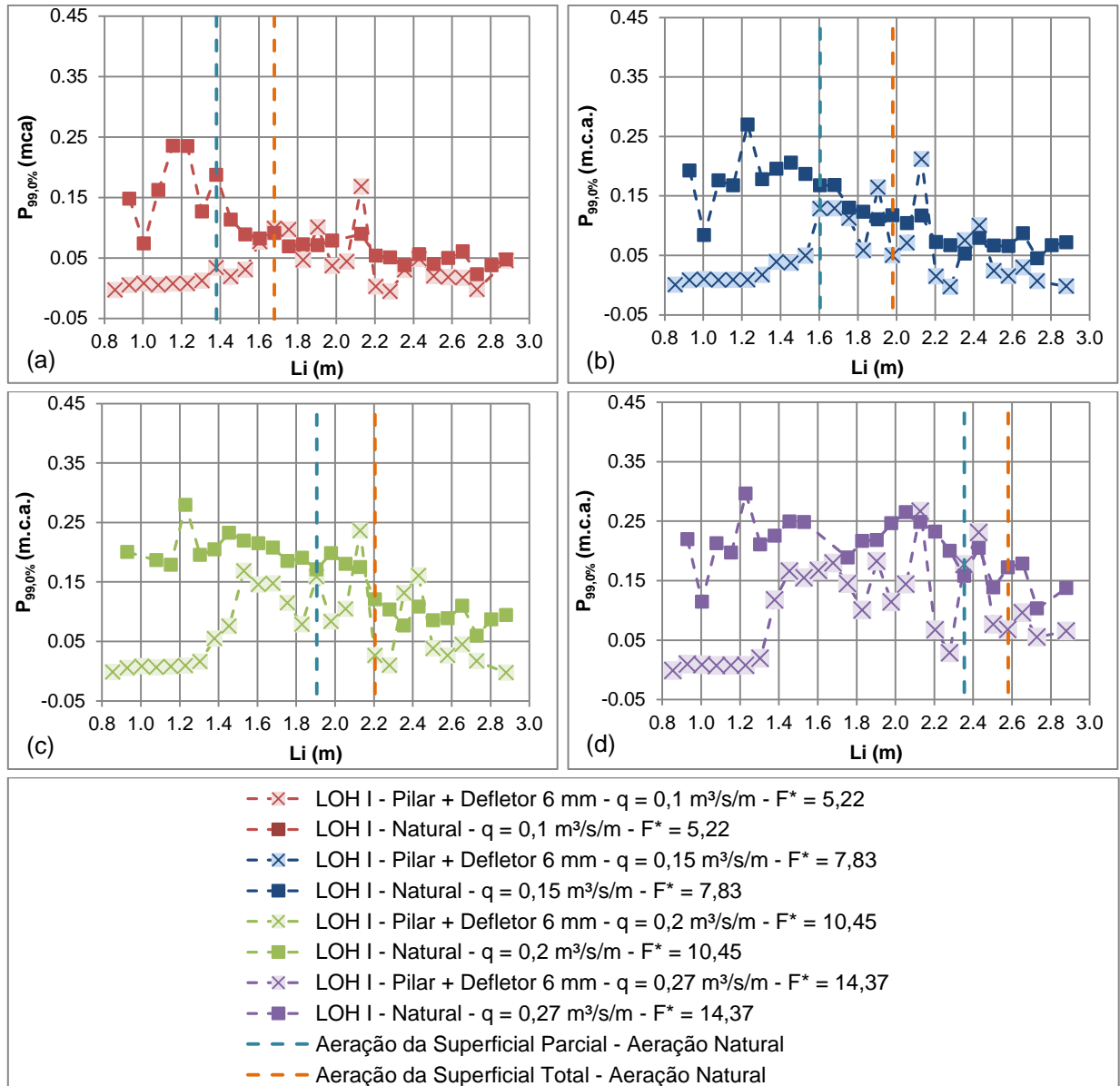


Figura 76 - Comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de 99,0% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

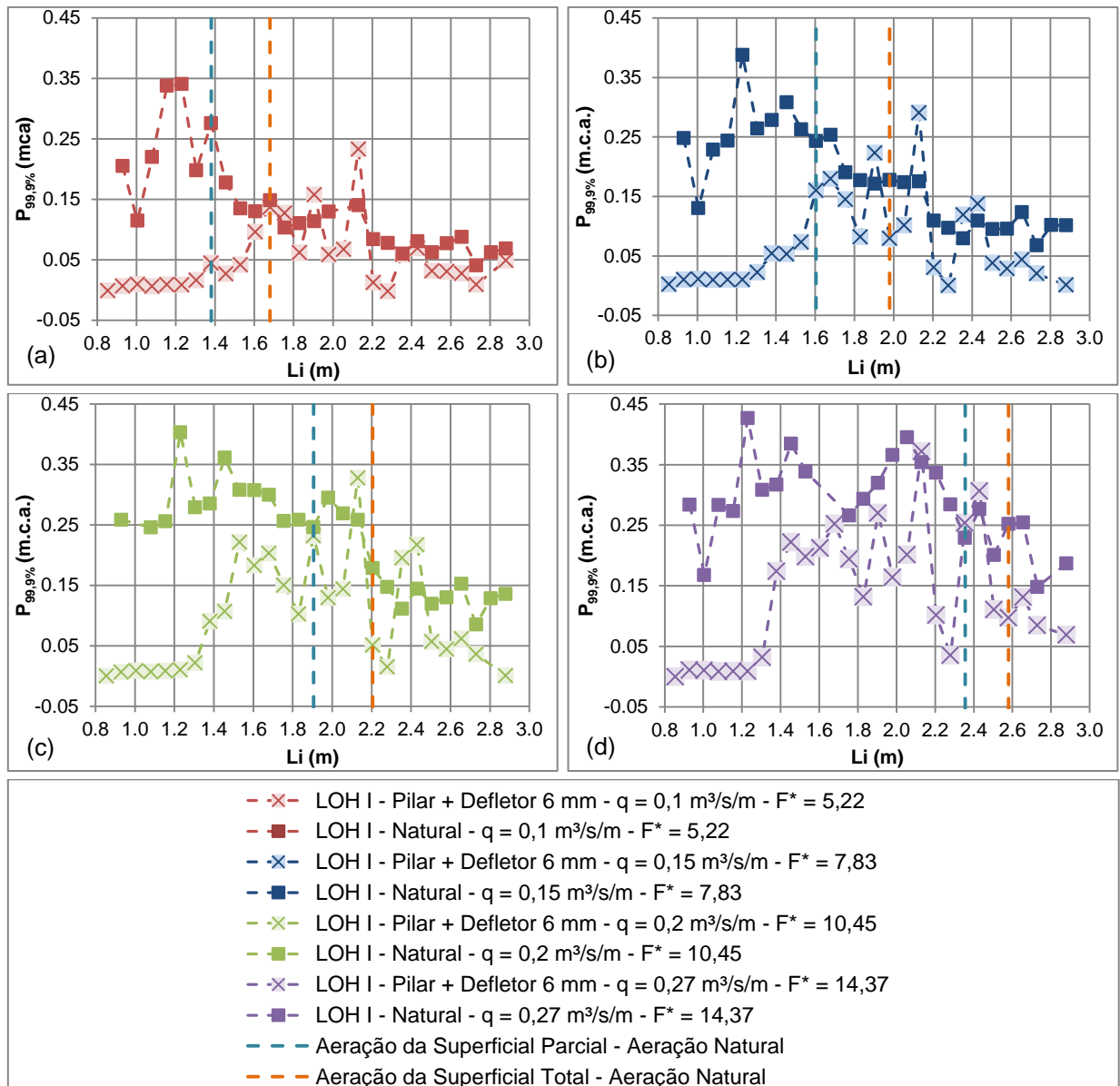


Figura 77 - Comparação das pressões extremas máximas associadas às probabilidade de não-excedência de 99,9% entre a aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor 6 mm para os espelhos dos degraus para (a)  $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b)  $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c)  $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (d)  $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

A partir da comparação das cargas de pressões máximas dos espelhos entre as duas configurações ensaiadas, verifica-se que a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm apresentou valores de carga de pressão extrema máxima inferiores a aeração natural até a posição de início da aeração superficial total do escoamento para a aeração natural, pois é a partir desta posição que a aeração do escoamento está desenvolvida para as duas configurações de ensaio e, então, ambas apresentam valores de carga de pressão máxima semelhantes.

## **4.2 Resultados da Instalação Experimental do Laboratório de Hidráulica Experimental – FURNAS Centrais Elétricas**

### **4.2.1 Comportamento do escoamento ao longo do vertedouro em degraus – Modelo LAHE**

A partir da análise visual do escoamento sobre vertedouro em degraus para a aeração natural e as diferentes configurações de aeração induzida ensaiadas identificou-se diferentes comportamentos, que estão descritos e representados através de figuras e imagens do escoamento. Para representar o escoamento foram utilizadas as imagens para a vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , que caracteriza, do conjunto de ensaios realizados, a vazão intermediária.

Para a aeração natural, aeração induzida por pilares e aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm apresentaram comportamentos com características distintas e foram descritos separadamente. Já para as configurações de aeração induzida por pilares + defletor de 3, 6 e 9 mm, como apresentaram comportamentos similares, os mesmos foram apresentados de forma conjunta.

As análises visuais do escoamento sobre o vertedouro em degraus com aeração natural apresentaram as três regiões características descritas por Chanson (1994a), que são: zona sem aeração do escoamento, zona com aeração parcial do escoamento e zona com aeração total do escoamento.

A Figura 78 (a), (b) e (c) apresentam o comportamento do escoamento sobre o vertedouro em degraus com aeração natural para a vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .

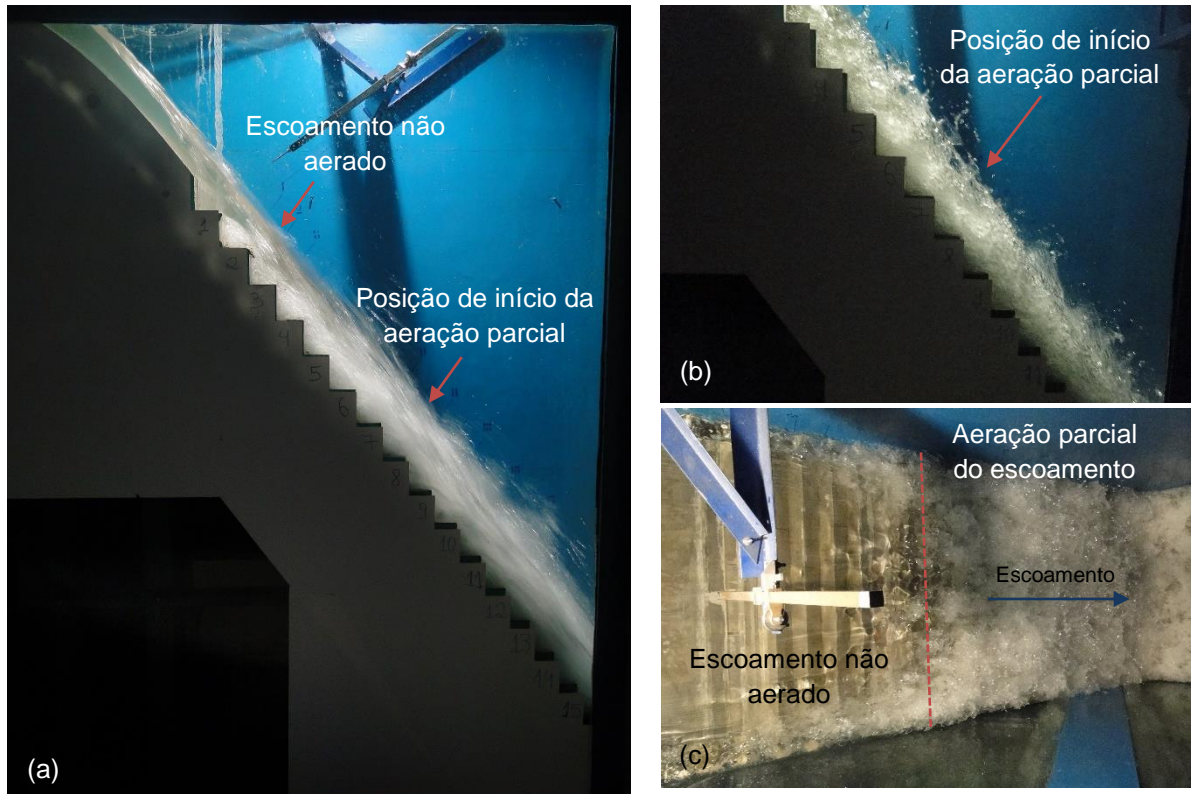


Figura 78 – Visualização do escoamento sobre vertedouro de degrau com aeração natural, para vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Através da visualização do escoamento sobre o vertedouro em degraus para a aeração natural, observa-se que no trecho inicial da calha há uma região em que o escoamento possui aspecto bem definido, liso e transparente, ou seja, não ocorre aeração no escoamento, conforme pode-se visualizar na Figura 78 c.

Esse aspecto liso e transparente do escoamento ocorre até o ponto de início da aeração parcial (Figura 78 a e b), local onde a camada limite atinge a superfície livre, fazendo com que ocorra a incorporação de ar da atmosfera no escoamento e inicie o processo de aeração parcial. Para caracterizar o ponto de início da aeração superficial parcial será utilizado o  $L_a$ , que mede a distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início de aeração parcial.

A jusante da posição de início da aeração natural, somente para as menores vazões específicas, devido às questões construtivas do modelo, verificou-se a posição em que a altura do escoamento está estável e, além disso, verificou-se, entre as cavidades dos degraus, a estabilidade dos vórtices aerados. Nessa posição a aeração do escoamento está completamente desenvolvida, ou seja, tem-se a aeração total do escoamento ( $L_n$ ), que é a distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início da aeração total.

As análises visuais do escoamento sobre o vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares, instalados nas laterais do vertedouro, a partir do início da ogiva até o primeiro degrau o apresentam duas regiões características, a região em que ocorre a aeração inferior do escoamento e a região da aeração da superfície, sendo que esta pode ser dividida em parcial e total. As regiões foram identificadas através da visualização do escoamento lateral e superior e estão identificadas na Figura 79 e descritas abaixo.

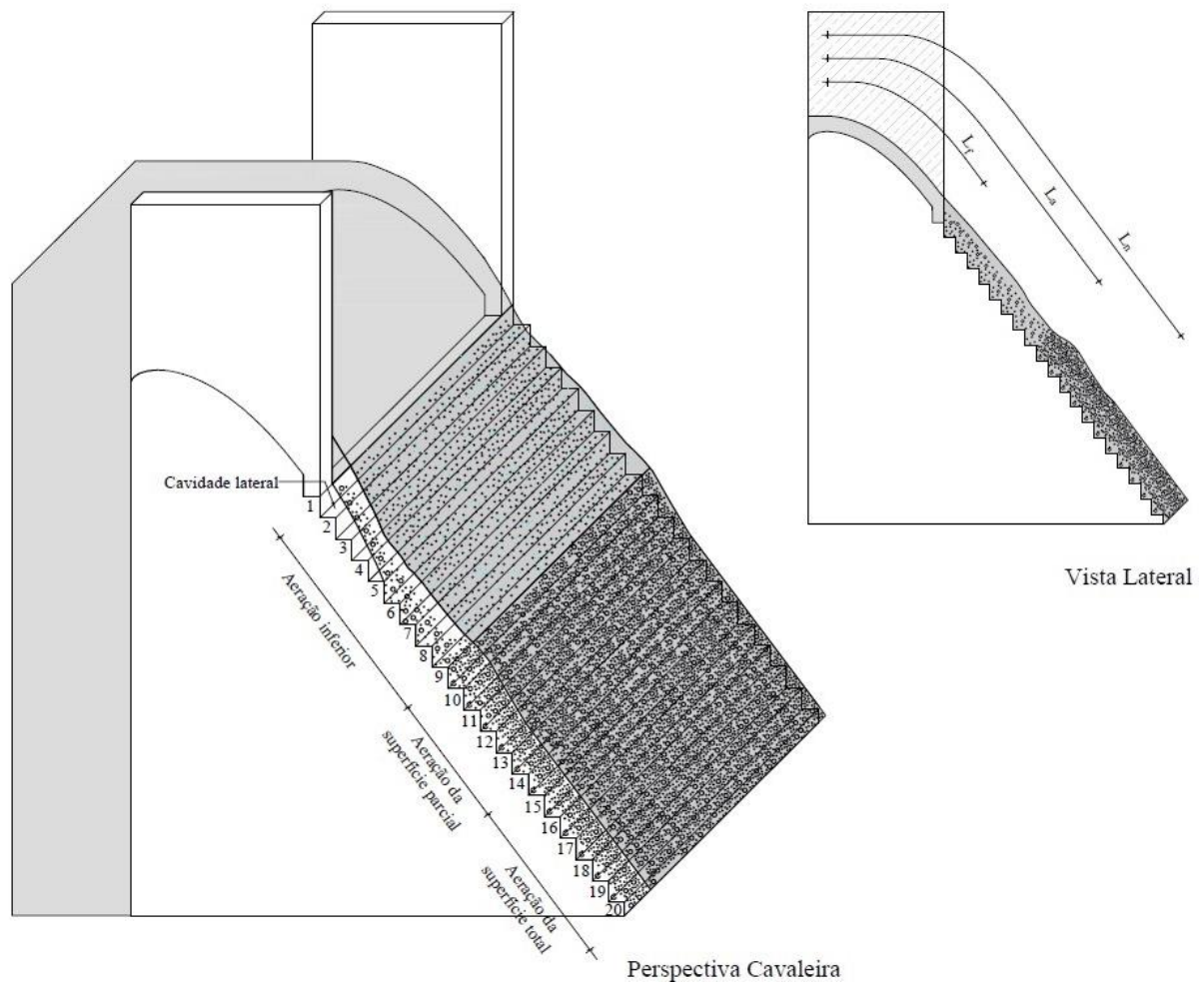


Figura 79 – Desenho esquemático do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida por pilares

**Região de aeração inferior:** ocorre na parte inferior do escoamento, não atingindo toda a altura da lâmina de água e, se desenvolve, em virtude das cavidades formadas nas laterais (Figura 80) do vertedouro, a partir do segundo degrau, as quais se formam devido ao estreitamento da calha, pela presença dos pilares a partir do início da ogiva até o primeiro degrau. A região de aeração inferior, para todas as vazões específicas ensaiadas, iniciou a partir do segundo degrau, no

entanto, com o aumento das vazões a concentração de ar diminuiu, pois a altura da lâmina de água aumentou. Desta forma, a posição longitudinal da aeração inferior ( $L_f$ ) é a distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição em que ocorre o início da aeração inferior do escoamento do vertedouro em degraus.

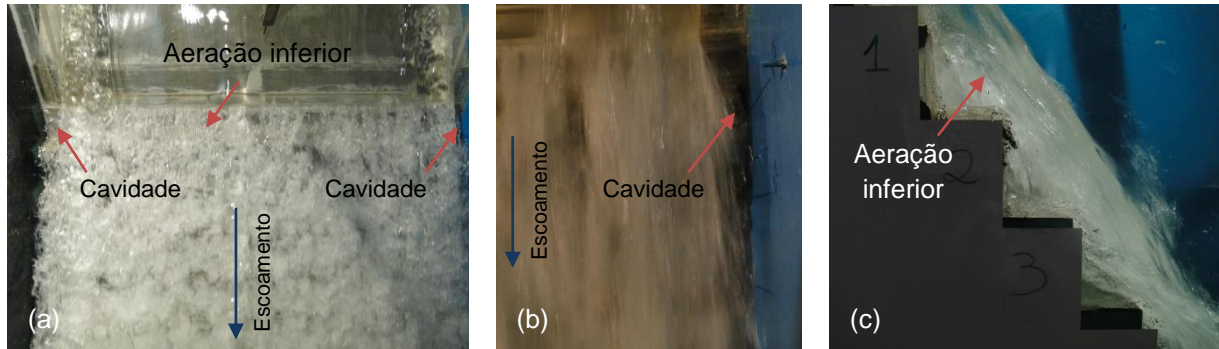


Figura 80 – Aeração inferior da aeração induzida por pilares e vazão de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

**Região de aeração superficial do escoamento:** ocorre a jusante da aeração inferior quando toda a lâmina de água está aerada. Essa região pode ser dividida em aeração superficial parcial, que ocorre quando as aerações inferior e superior se encontram e a camada limite atinge a superfície livre do escoamento, e em aeração total do escoamento, que ocorre quando a aeração e a profundidade do escoamento são uniformes, para uma mesma vazão, conforme pode-se visualizar na Figura 81. No entanto, não foi possível identificar para todas as vazões específicas a aeração total do escoamento, devido às questões construtivas do modelo. As regiões são caracterizadas pela  $L_a$ , que é a distância a partir da crista do vertedouro em degraus até a aeração superficial parcial e  $L_n$ , que é distância a partir da crista do vertedouro em degraus até a aeração superficial total.

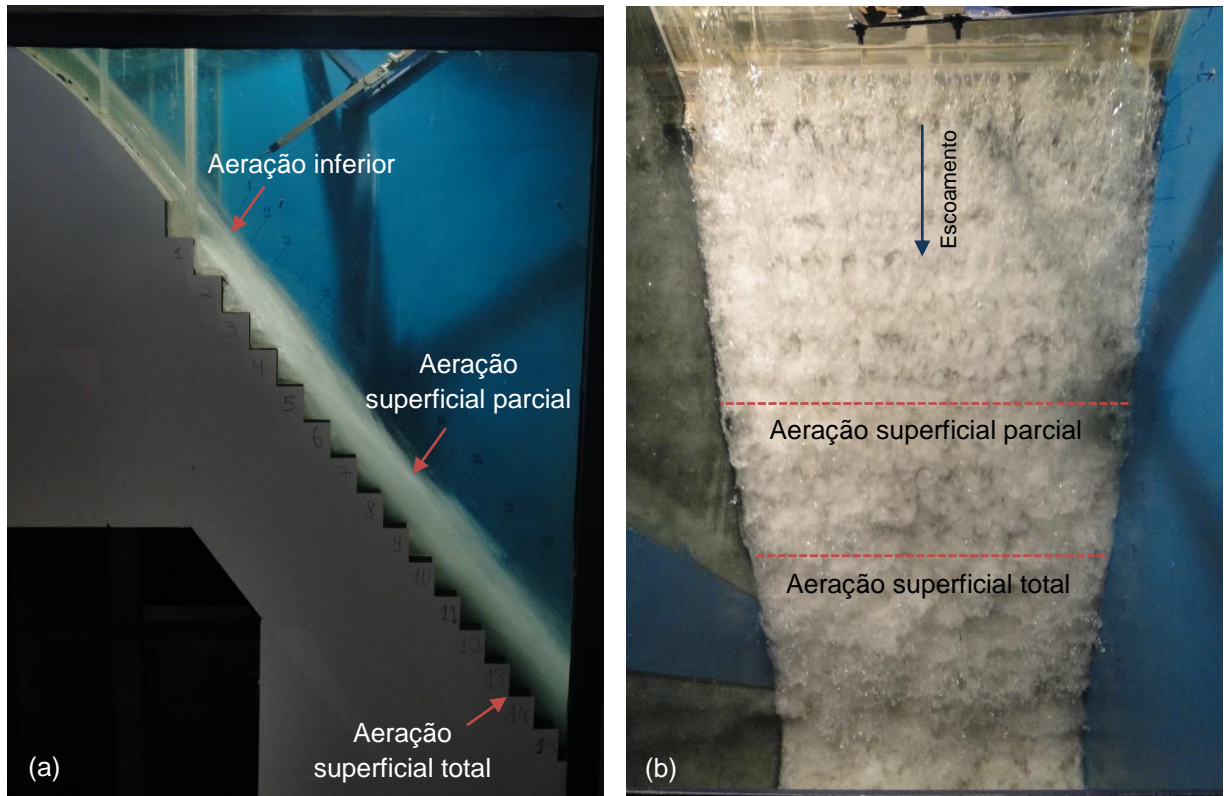


Figura 81 – Aeração superior parcial e total da aeração induzida por pilares para a vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

A partir da visualização lateral do escoamento, conforme a Figura 81 a, os vórtices estáveis nas cavidades dos degraus ocorrem em posições longitudinais anteriores a aeração superficial parcial, que foi identificada pela visualização da vista superior do escoamento. Com isso, pode-se dizer que a aeração inferior do escoamento, provocada pela presença dos pilares, é mais intensa nas laterais, do que no centro da calha.

As análises visuais do escoamento sobre o vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares + defletor de  $0 \text{ mm}$ , instalado no primeiro degrau e com inclinação igual à inclinação do pseudo-fundo da calha, apresentou comportamento similar ao comportamento da aeração natural, porém desenvolveu-se, nas laterais do escoamento, a aeração inferior, devido à presença dos pilares. Com isso, a partir da visualização do escoamento lateral e superior, foram identificadas duas regiões características que ocorrem em toda a largura do vertedouro e a região em que



ocorre a aeração inferior somente nas laterais. Na

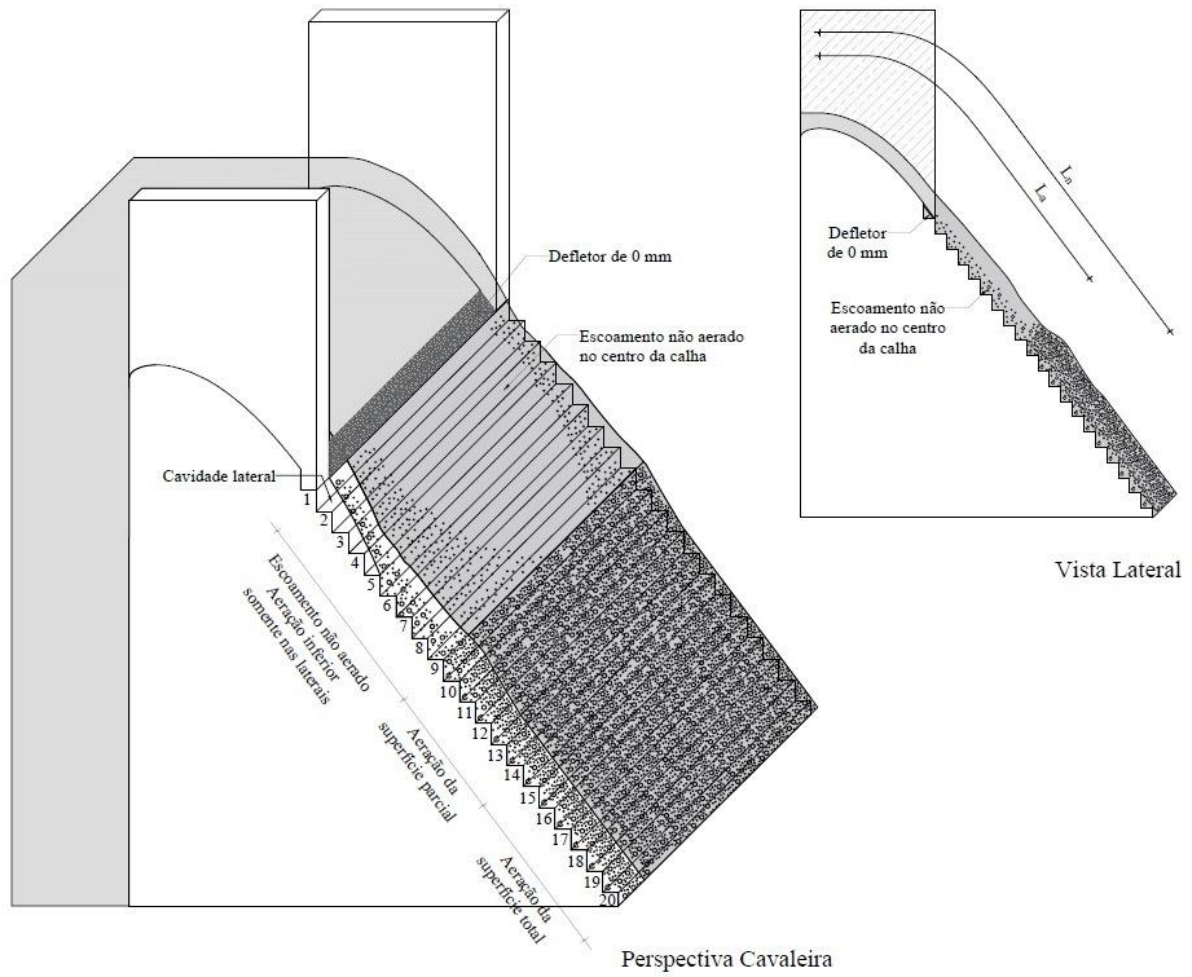


Figura 82 estão identificadas as regiões e estão descritas abaixo.

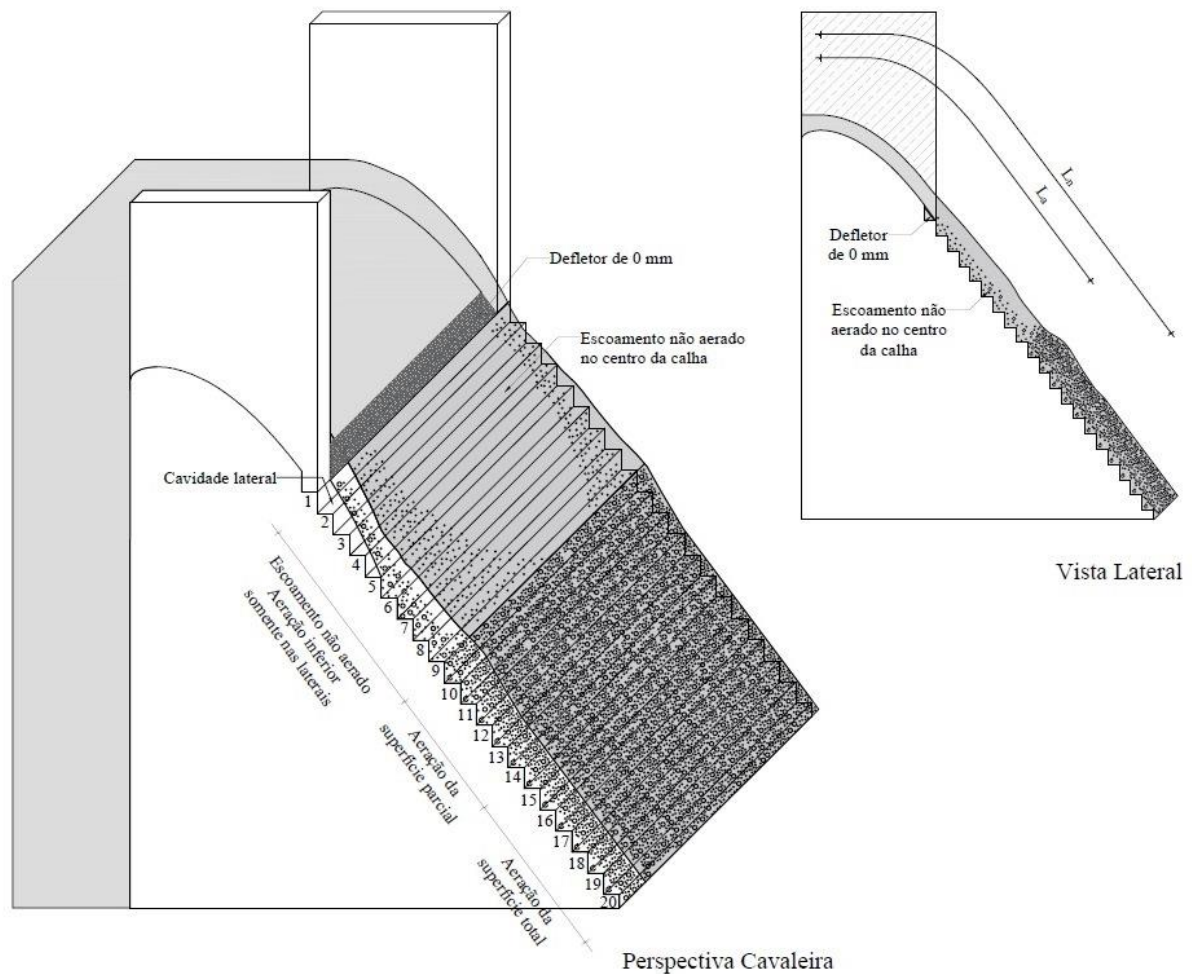


Figura 82 – Desenho esquemático do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm

**Região sem aeração:** ocorre no trecho inicial e central da calha e, o escoamento, possui aspecto liso e transparente, sem aeração no escoamento (Figura 83).

**Região de aeração inferior:** ocorre na parte inferior do escoamento e apenas nas laterais do vertedouro (Figura 83), em virtude da incorporação de ar, a partir da cavidade lateral, que se forma pela presença dos pilares. No entanto, essa aeração não é suficiente para se estender em toda a largura da calha em degraus. A distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição em que ocorre a aeração inferior é chamada de aeração inferior ( $L_i$ ).

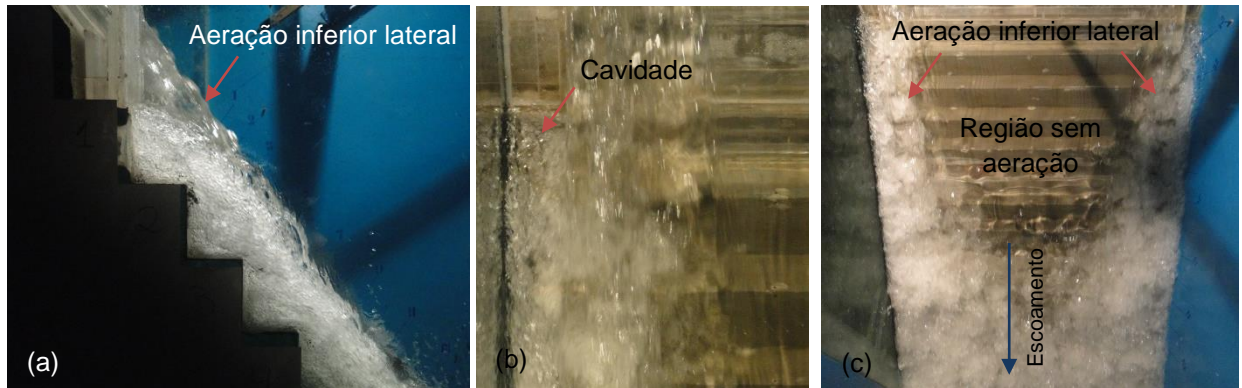


Figura 83 – Região sem aeração e aeração inferior da aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm para vazão específica de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m

**Região de aeração superficial do escoamento:** ocorre quando toda a lâmina de água está aerada. Essa região pode ser dividida em aeração superficial parcial, que ocorre quando a camada limite atinge a superfície livre do escoamento e em aeração total do escoamento, que ocorre quando a aeração e a profundidade do escoamento são uniformes, para uma mesma vazão, conforme pode-se visualizar na Figura 84. No entanto, não foi possível identificar para todas as vazões específicas a aeração total do escoamento, devido às questões construtivas do modelo. As regiões são caracterizadas pela  $L_a$ , que é a distância a partir da crista do vertedouro em degraus até a aeração superficial parcial e  $L_n$ , que é distância a partir da crista do vertedouro em degraus até a aeração superficial total.

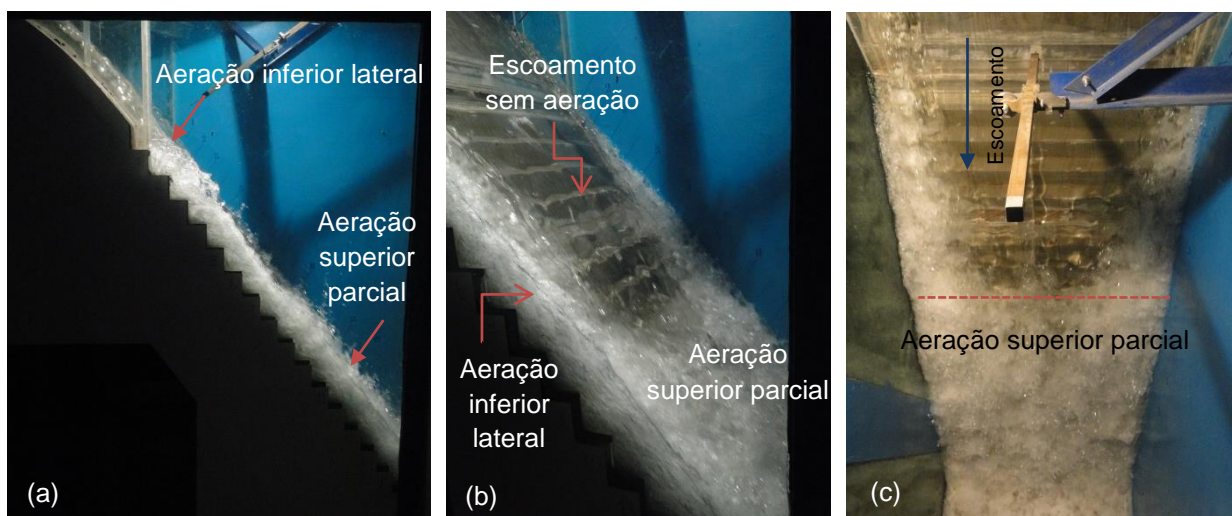


Figura 84 – Região de aeração superficial parcial e total da aeração induzida por pilares + defletores 0 mm para vazão específica de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m

Através da análise visual percebe-se que o comportamento do escoamento com aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm se assemelha com o comportamento do escoamento com aeração natural. Além disso, pode-se inferir que o defletor de 0 mm instalado no primeiro degrau funciona como uma extensão da ogiva, desta maneira, a disposição dos pilares até o primeiro degrau influencia na incorporação de ar no escoamento, pois no escoamento com aeração induzida por pilares houve uma maior concentração de ar na parte inferior do escoamento a partir do segundo degrau do vertedouro.

As análises visuais do escoamento sobre o vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e defletor de 3, 6 e 9 mm, ou seja, os defletores possuem ângulos diferentes da calha em degraus e, apesar de posições longitudinais distintas, os três defletores apresentam comportamentos semelhantes, onde foi possível identificar quatro regiões características, que foram identificadas através da visualização do escoamento lateral e superior. Na

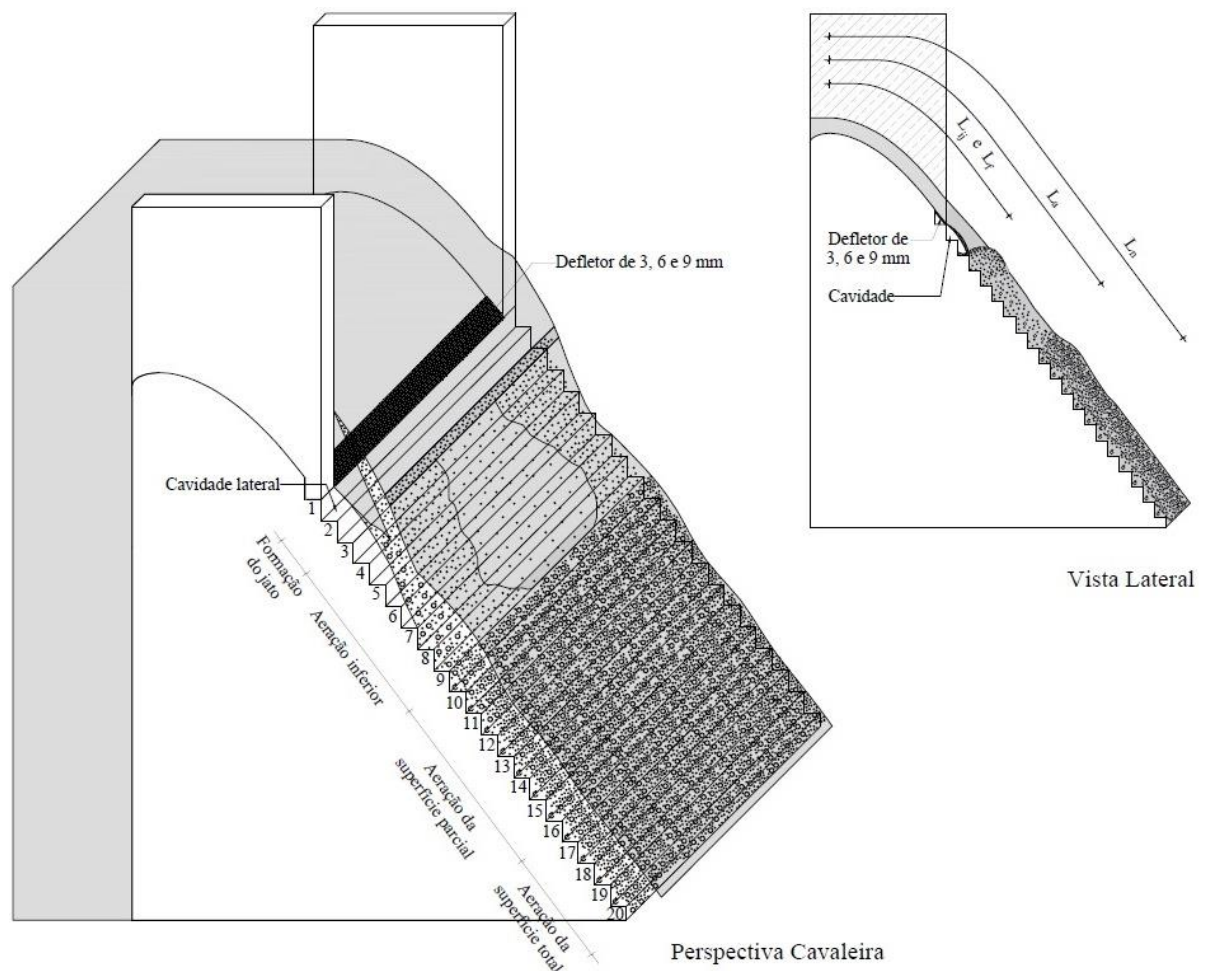


Figura 85 estão identificadas as regiões e abaixo as mesmas estão descritas.

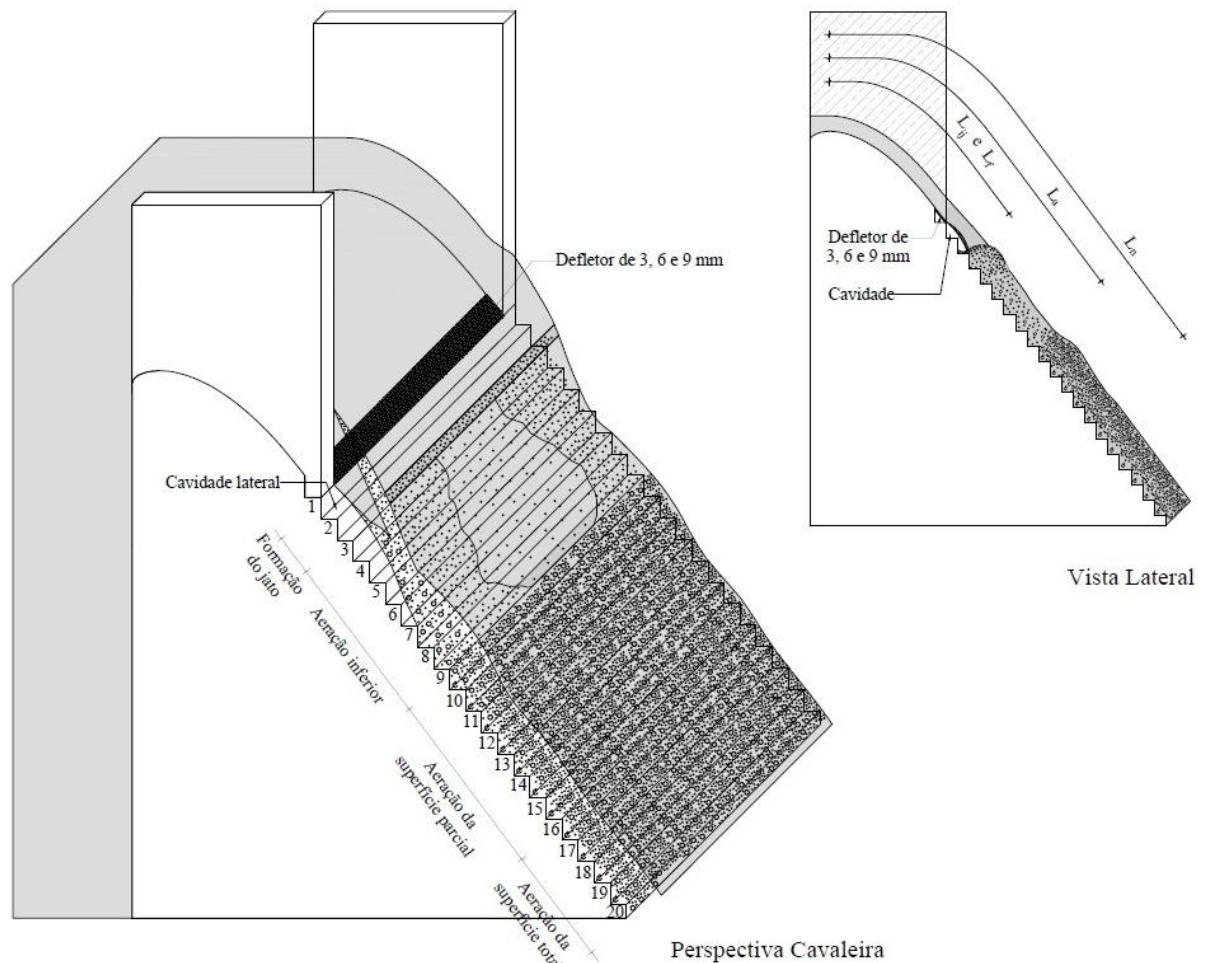


Figura 85 - Desenho esquemático do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida por pilares + defletor de 3, 6 e 9 mm

**Região de formação do jato:** essa região é caracterizada pela formação de um jato de água, praticamente liso e transparente, com pequenas camadas de aeração, que ocorre quando o escoamento entra em contato com o defletor, conforme pode-se visualizar na Figura 86. O jato de água é formado a partir da parte final do defletor, momento em que inicia o lançamento do escoamento sobre os degraus e termina quando o jato impacta os degraus do vertedouro. O jato de água é influenciado pela espessura do defletor, sendo que conforme a espessura aumenta e, conseqüentemente, o ângulo em relação ao pseudo-fundo da calha, o jato de água é lançado mais a jusante. A lâmina de água do jato também influencia na posição em que ocorre o impacto do jato de água, ou seja, para as maiores lâminas de água e vazões específicas o impacto ocorre mais a montante. A distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição em que o jato de água impacta o degrau do vertedouro é chamada de posição longitudinal do impacto do jato ( $L_{ij}$ ).

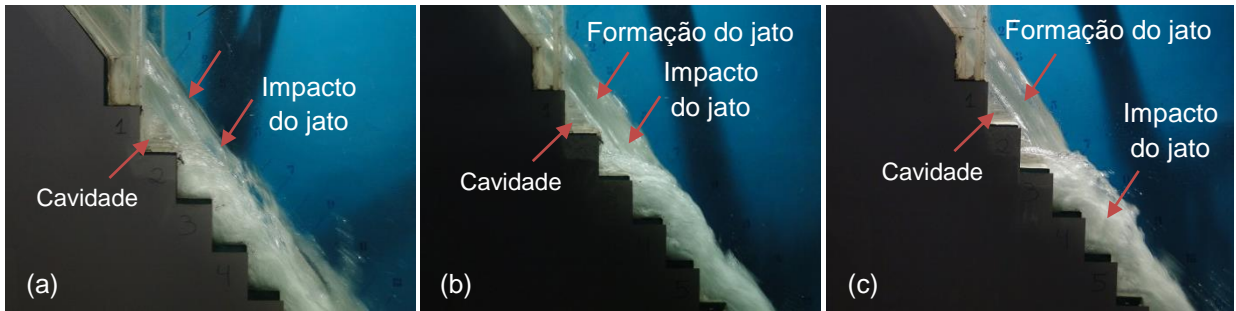


Figura 86 – Vista lateral da formação do jato de água para a vazão de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm

**Região de aeração inferior:** após o impacto do jato de água no degrau do vertedouro, se desenvolve a aeração da parte inferior do escoamento, que ocorre pela incorporação de ar através da cavidade formada pelo lançamento do jato de água e, também, através das cavidades laterais formadas pela presença dos pilares, com isso, a aeração inferior nas laterais é maior que a aeração no centro da calha, como pode-se visualizar na Figura 87. Cabe ressaltar que a aeração inferior não ocorre na totalidade da lâmina de água, apenas na parte inferior do escoamento. A distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição em que ocorre o início da aeração inferior do escoamento do vertedouro em degraus é chamada de posição longitudinal da aeração inferior ( $L_f$ ).

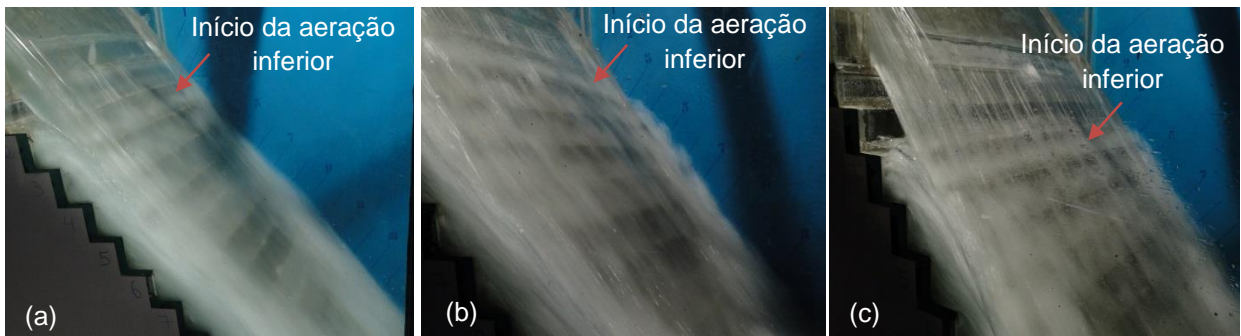


Figura 87 - Vista diagonal da aeração inferior para a vazão de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm

**Região de aeração superficial do escoamento:** ocorre quando toda a lâmina de água está aerada. Essa região pode ser dividida em aeração superficial parcial, que ocorre quando as aerações inferior e superior se encontram e a camada limite atinge a superfície livre do escoamento (Figura 88 e Figura 89) e a aeração total do escoamento, que ocorre quando a aeração e a profundidade do escoamento

são uniformes, para uma mesma vazão, porém, a última não foi possível identificar para todas as vazões específicas por questões construtivas do modelo.

Para identificar a posição em que inicia a aeração superficial parcial, o escoamento foi analisado a partir da visualização lateral e superior do vertedouro, pois nas laterais a aeração é mais intensa, quando comparada ao centro da calha, que, conforme pode-se visualizar na Figura 89, possui um aspecto mais transparente. Isso ocorre devido à influência dos pilares e da expulsão do escoamento, com presença de ar, que ocorre pelas laterais da calha. A Figura 88 e a Figura 89 exemplificam essa comparação da vista lateral e superior do escoamento.

A distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início da aeração superficial parcial do vertedouro é chamada de posição de início de aeração superficial parcial ( $L_a$ ) e a distância longitudinal da crista do vertedouro até a posição de início da aeração superficial total do vertedouro é chamada de posição de início de aeração superficial total ( $L_n$ ).

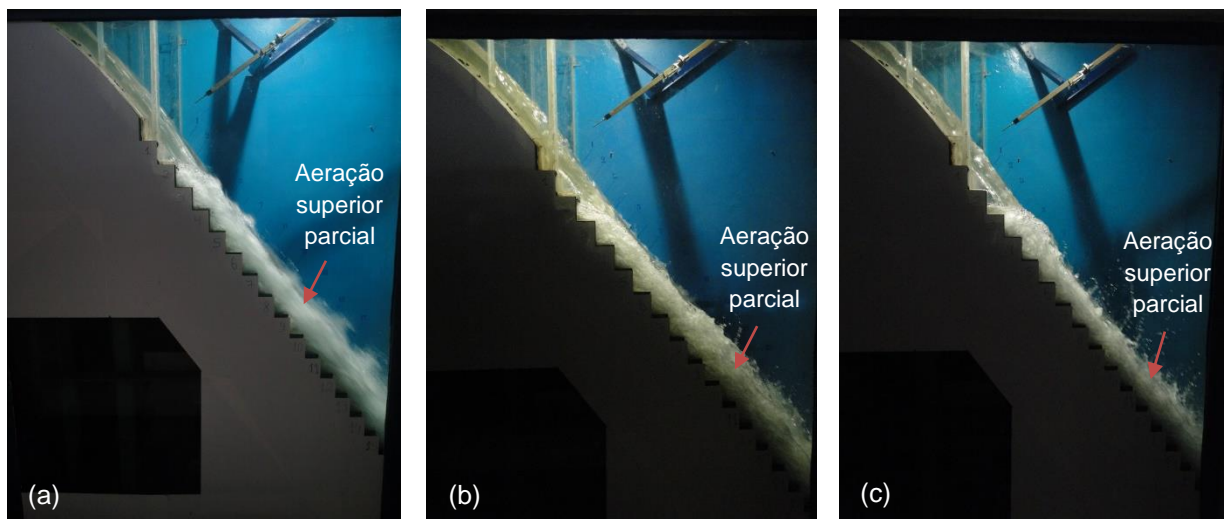


Figura 88 - Vista lateral da aeração superficial parcial para a vazão de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm

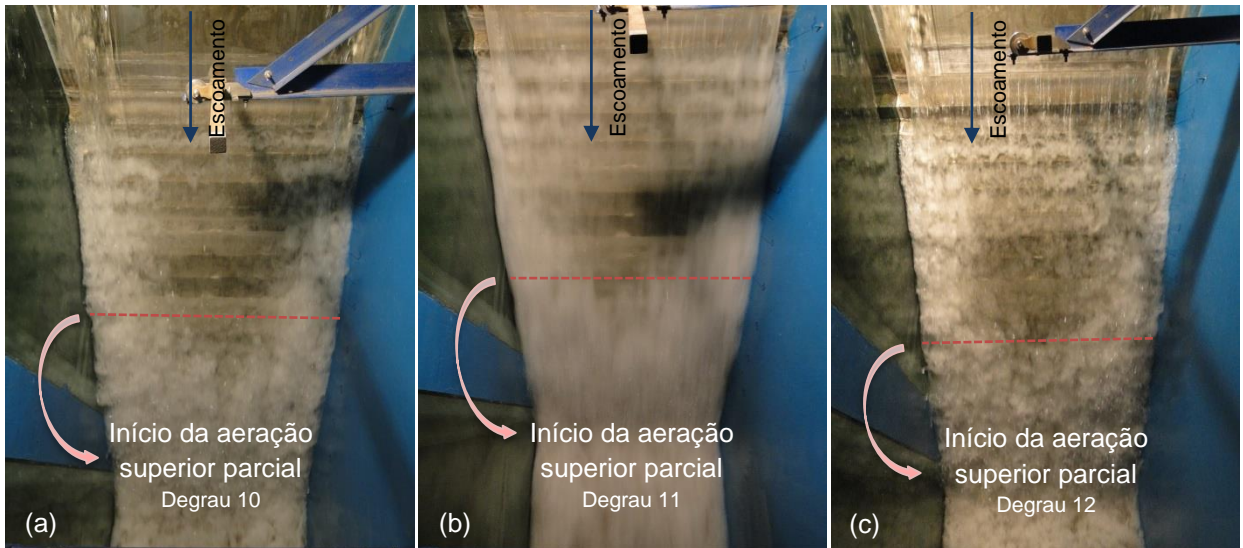
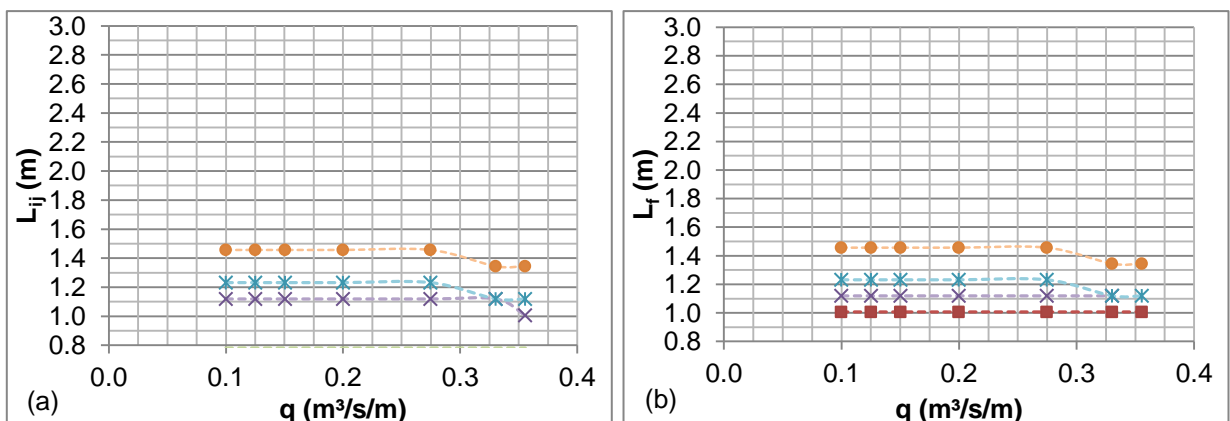


Figura 89 - Vista superior da aeração superficial parcial para a vazão de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e para aeração induzida por (a) pilares + defletor 3 mm, (b) pilares + defletor 6 mm e (c) pilares + defletor 9 mm

#### 4.2.2 Comportamento das posições características do escoamento com aeração induzida

As posições características do escoamento com aeração induzida, obtidas a partir da análise visual dos ensaios, estão apresentadas em função da vazão específica. As posições características são:  $L_{ij}$ , posição do impacto do escoamento nos degraus, para as configurações defletores,  $L_f$ , posição de início da aeração inferior do escoamento e  $L_a$ , posição de início da aeração superficial do escoamento, todas as posições medidas a partir da crista do vertedouro.

Na Figura 90 estão apresentadas as posições de impacto do jato de água, que ocorre devido ao lançamento do escoamento quando em contato com os defletores e, também, a posição de início da aeração inferior do escoamento.





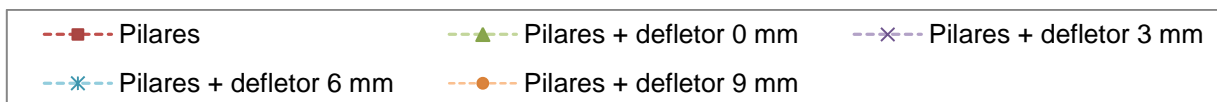


Figura 90 – Posição características do escoamento sobre vertedouro com aeração induzida (a) posição de impacto do jato de água e (b) posição de início da aeração inferior

Para as configurações de aeração induzida por pilares + defletor 3, 6 e 9 mm, em razão do defletor com ângulo diferente do pseudofundo da calha em degraus, o escoamento é lançado sobre os degraus formando um jato de água e o comprimento deste jato coincide com a posição de início da aeração inferior do escoamento, como pode ser visualizado comparando a Figura 90 (a) e (b). Para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, como o defletor possui o mesmo ângulo do pseudofundo, o escoamento não é lançado e, com isso, não forma um jato de água e a aeração inferior não ocorre em toda a extensão da calha, apenas nas laterais do vertedouro.

Já para a aeração induzida por pilares a aeração inferior ocorre na mesma posição para todas as vazões específicas, no entanto, como não há defletor instalado na estrutura, não ocorre à formação do jato.

A partir da Figura 90 (a) percebe-se que conforme a espessura do defletor aumenta o comprimento do jato de água é maior, ou seja, o escoamento é lançado mais a jusante. A vazão específica pouco influencia na posição do impacto do escoamento, sendo que somente para as maiores vazões específicas, o jato de água se deslocou um degrau para montante, pois a espessura da lâmina de água é maior.

Comparando a Figura 90 (a) e (b), percebe-se que mesmo não ocorrendo a formação do jato de água na aeração induzida por pilares, ocorre a aeração inferior do escoamento na posição  $L_f = 1,00$  m, para todas as vazões específicas ensaiadas. Para aeração induzida por pilares + defletor 3 mm e vazão específica de  $0,356$  m<sup>3</sup>/s/m, a aeração inferior do escoamento não ocorreu em toda a extensão da calha em degraus, que pode estar relacionado ao preenchimento da cavidade no centro da calha, impedindo com que o ar seja incorporado na parte inferior do escoamento. Com isso, para as vazões específicas ensaiadas, a posição de impacto do jato de água ocorre entre as posições longitudinais 1,00 a 1,10 m e a posição de início da aeração ocorre na posição de 1,00 m.

Para a aeração induzida por pilares + defletor 6 mm, a posição de impacto do jato de água e de início da aeração inferior, ocorrem nas mesmas posições

longitudinais, comparando as mesmas vazões específicas, entre as posições de 1,10 a 1,25 m. O mesmo acontece para a aeração induzida por pilares + defletor 9 mm, as posições do impacto do jato e da aeração inferior ocorrem entre as posições 1,35 a 1,45 m.

Na Figura 91 estão apresentadas as posições de início da aeração superficial parcial em função da vazão específica, comparando a aeração natural com a aeração induzida por pilares (Figura 91 (a)) e a aeração natural com as configurações de aeração induzida por pilares + defletores (Figura 91 (b)).

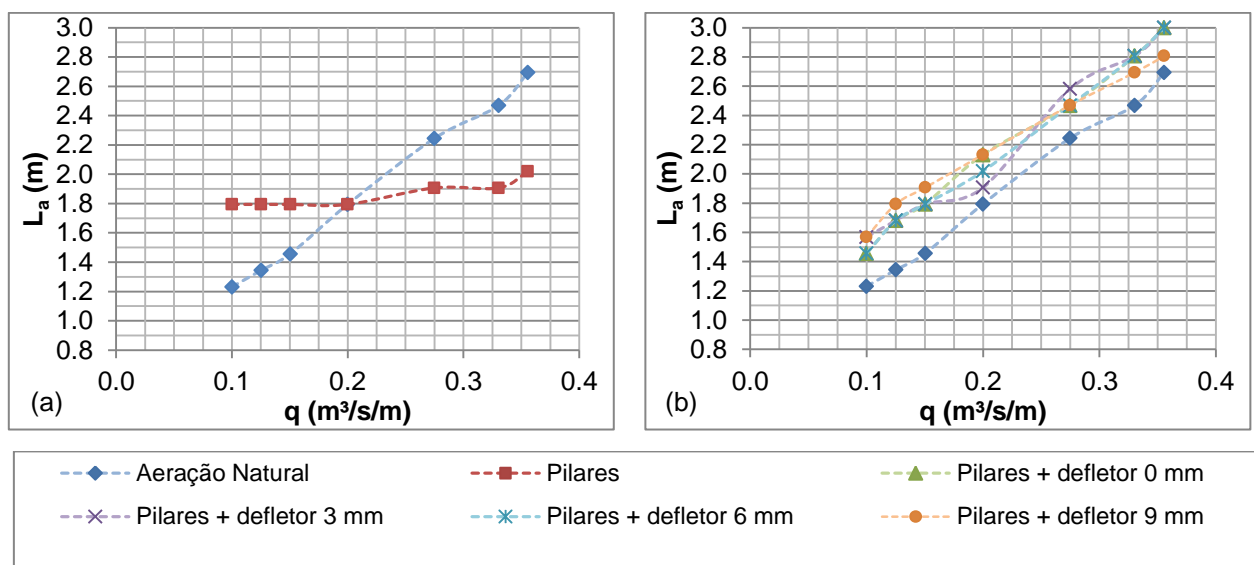


Figura 91 - Posição de início da aeração superficial parcial para aeração natural e induzida

A posição de início de aeração superficial parcial é influenciada pela vazão específica e pela configuração de ensaio, conforme pode-se visualizar na Figura 91. Para a aeração natural, a posição de início de aeração superficial parcial cresce linearmente com o aumento da vazão específica. Já para a aeração induzida por pilares a vazão específica exerce menor influência sobre  $L_a$ , ou seja, as posições de início de aeração superficial parcial mantiveram-se praticamente constante com o aumento da vazão específica, oscilaram entre as posições longitudinais 1,80 a 2,00 m. Sendo que, conforme a Figura 91 (a), até a vazão específica 0,200 m $^3/s/m$ , para aeração induzida por pilares, o  $L_a$  foi superior ao  $L_a$  da aeração natural. E para as vazões específicas superiores, o  $L_a$  ocorreu em posições longitudinais anteriores, quando comparado à aeração natural.

Para a aeração induzida por pilares + defletor 0, 3, 6 e 9 mm, as posições de início da aeração superficial parcial, apresentaram valores próximos entre si e com a mesma tendência linear crescente da aeração natural, porém apresentaram valores superiores. Com isso, pode-se dizer que a aeração induzida por pilares + defletores não anteciparam a aeração superficial parcial do escoamento.

Os resultados da Figura 90 e da Figura 91, que apresentam as posições características do escoamento com aeração induzida, foram adimensionalizados com a finalidade de tornar possível prever aproximadamente a localização da região em que ocorre a posição de impacto do jato, posição de início da aeração inferior e posição de início da aeração superficial parcial em um determinado protótipo com aeração induzida por pilares e defletores.

Na Figura 92 apresenta as posições características adimensionalizadas pela profundidade do escoamento no primeiro degrau ( $h_0$ ), posição onde foram instalados os defletores e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso do degrau ( $F^*$ ). E para cada posição característica foi ajustada uma única curva para todas as configurações, pois há pouca dispersão entre os adimensionais das posições características e, assim gerada uma equação.

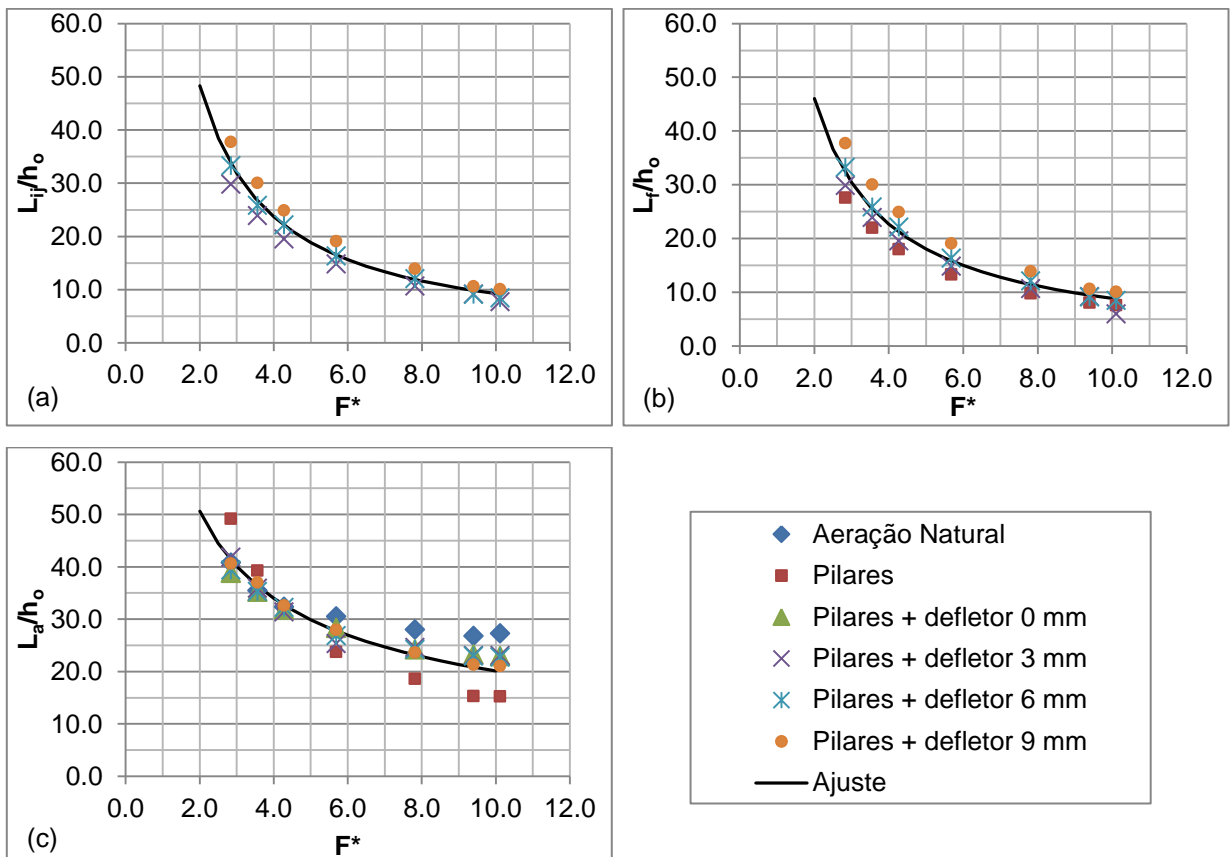


Figura 92 - Posições características do escoamento com aeração induzida adimensionalizados e equações ajustadas (a) posição de impacto do jato, (b) posição de início da aeração inferior e (c) posição de início da aeração superficial parcial

A partir do comportamento do adimensional das posições características do escoamento com aeração induzida, percebe-se que conforme o número de Froude rugoso aumenta, os mesmos decrescem. No entanto, isso não significa que os valores das posições características diminuem com o aumento do número de Froude rugoso, pois é a profundidade do escoamento no primeiro degrau ( $h_o$ ) que cresce, conforme aumenta o número de Froude rugoso.

A função que melhor adequou-se para representar as posições características e o número de Froude rugoso foi a função de regressão potencial, apresentada na Equação 10. Os coeficientes (a e b) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais para cada posição característica estão apresentados na Tabela 8.

$$\frac{L_{\text{característico}}}{h_o} = a(F^*)^b \quad \text{Equação 10}$$

Tabela 8 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 10 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para cada posição característica.

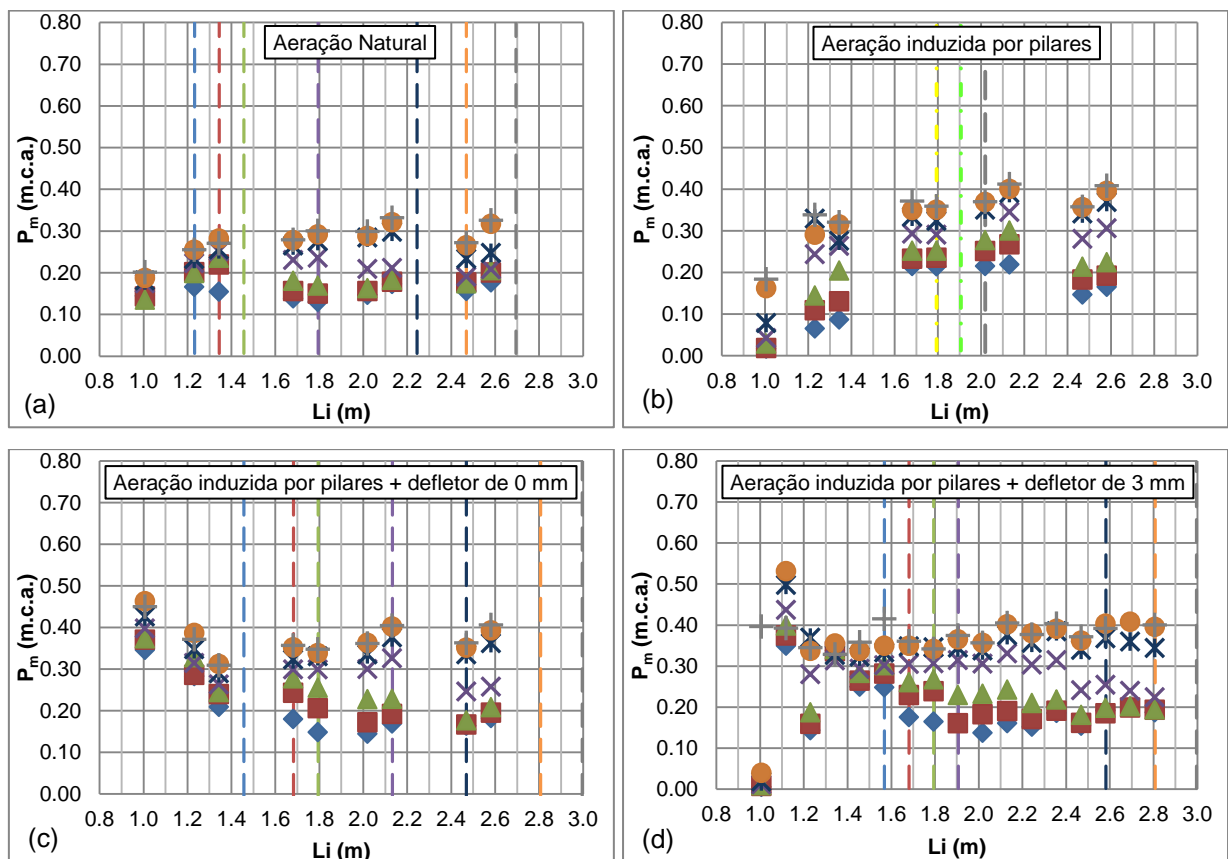
<b>Posição característica</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Posição de impacto do jato ( $L_{ij}$ )	98,4730	-1,0268	0,9486
Posição de início da aeração inferior ( $L_i$ )	93,3641	-1,0209	0,9203
Posição de início da aeração superficial parcial ( $L_a$ )	75,3299	-0,5737	0,8955

As funções potenciais ajustadas para cada posição característica apresentaram coeficientes de correlação satisfatórios, indicando que o adimensional que relaciona a posição característica pela profundidade do escoamento sobre o primeiro degrau em função do número de Froude rugoso, pode ser utilizada para permitir uma previsão aproximada da localização de cada posição característica para um determinado protótipo de vertedouro em degraus.

### 4.2.3 Comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

As pressões médias registradas nos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas em função da configuração de ensaio (Figura 93) e da vazão ensaiada (Figura 94), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

Na Figura 93 estão apresentados os comportamentos da pressão média dos patamares dos degraus do vertedouro e a posição de início de aeração do escoamento, para todas as vazões ensaiadas, pela posição longitudinal ao longo da calha, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.



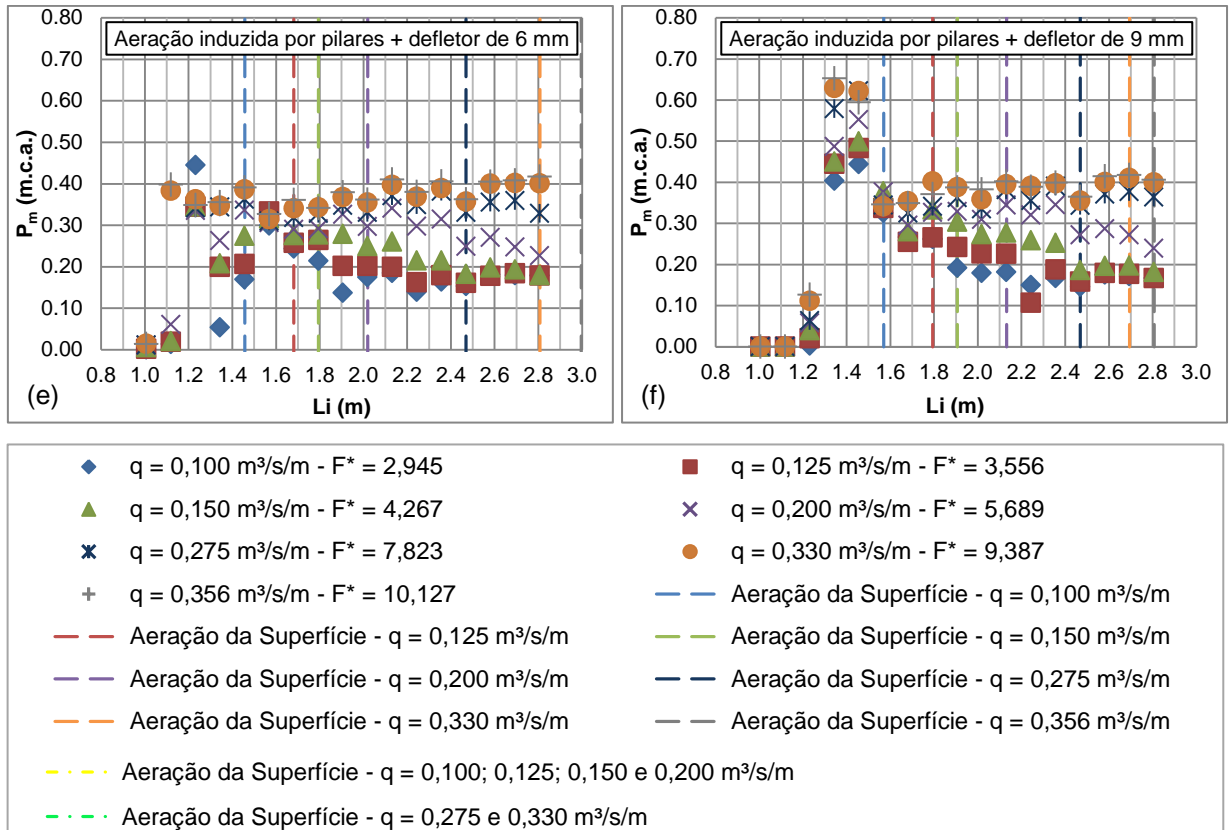


Figura 93 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm

Através da análise do comportamento das pressões médias verificadas nos patamares dos degraus ao longo do vertedouro para aeração natural percebe-se que a posição de início de aeração influencia no seu comportamento, pois as cargas de pressões médias, a jusante da região em que ocorre a aeração superficial do escoamento, decrescem e, posteriormente, estabilizam. Desta forma, os comportamentos são distintos para determinadas vazões específicas, sendo que quanto maior a vazão específica, mais a jusante ocorrem às posições de início de aeração e, assim, as cargas de pressões médias crescem na região não aerada do escoamento para, então, decrescer e estabilizar quando a aeração do escoamento está totalmente desenvolvida.

A partir da análise do comportamento das cargas de pressões médias e através da análise visual do escoamento a partir da lateral do vertedouro, para as diferentes configurações de aeração induzida, observou-se que o comportamento do escoamento nas laterais é diferente do comportamento que ocorre no centro da calha, pois o mesmo é influenciado pelos pilares instalados nas laterais, o qual

incorpora mais ar ao escoamento, porém o ar não chega ao centro da calha e se dissolve.

Para a aeração induzida por pilares, o comportamento das cargas pressões médias para os patamares ao longo do vertedouro foi similar na região não aerada, para todas as vazões ensaiadas, onde as mesmas apresentaram valores crescentes de carga de pressão média. E após a região em que ocorre a posição de início de aeração, os valores de carga de pressão média decresceram para as menores vazões específicas e, para as maiores vazões específicas, as cargas de pressões médias apresentaram praticamente constantes até o fim da calha em degraus.

Além disso, percebe-se que para as menores vazões específicas ensaiadas e para os primeiros degraus, as cargas de pressões médias são próximas de 0 m.c.a. e, inferiores a aeração natural. Esse comportamento pode ocorrer em virtude do ar que é incorporado ao escoamento através da cavidade lateral formada pela presença dos pilares, fazendo com que a carga de pressão média seja amortecida, mesmo com a ocorrência da elevação da altura da lâmina de água, em virtude dos pilares instalados nas laterais do vertedouro, que faz com que a largura da calha até o primeiro degrau diminua. No entanto, ao longo da calha do vertedouro esse ar presente no escoamento se dissipa e, com isso, as cargas de pressões médias se elevam até a região em que ocorre a aeração natural do escoamento. Já para as maiores vazões ensaiadas, como a lâmina de água é maior e a incorporação de ar não é suficiente para atingir toda a lâmina de água, os valores de carga de pressão média são superiores.

A partir da análise do comportamento das pressões médias verificadas nos patamares dos degraus ao longo do vertedouro para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm verifica-se que as cargas de pressões médias no início da calha em degraus decrescem, sendo que no início da calha em degraus os valores de carga de pressão média são altos, diferente do comportamento da aeração induzida por pilares, podendo estar relacionado com a elevação do nível de água, devido aos pilares instalados nas laterais e com o impacto do escoamento no patamar do degrau. Além disso, como não ocorre o lançamento do escoamento sobre os degraus, o ar não é incorporado à parte inferior do escoamento, sendo incorporado apenas nas laterais, em virtude da cavidade formada pela presença dos pilares, no entanto, a aeração não é suficiente para alcançar o centro da calha, aerando apenas as laterais do vertedouro.

Para todas as vazões específicas ensaiadas as cargas de pressões médias decresceram até a posição longitudinal de 1,35 m, no entanto, para as menores vazões específicas, entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões médias continuam decrescendo e após a região em que ocorre a aeração da superfície do escoamento as cargas de pressões médias praticamente estabilizam. Já para as vazões específicas entre 0,200 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a partir da posição longitudinal de 1,35 m, as cargas de pressões médias crescem e, para a vazão específica de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m após a aeração da superfície a carga de pressão média decresce, já para as vazões superiores, as cargas de pressões mantiveram-se praticamente estáveis até o final da calha em degraus, em virtude da posição de início da aeração natural ocorrer mais a jusante.

Para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores de 3, 6 e 9 mm, o comportamento das pressões médias dos patamares ao longo do vertedouro apresentou similaridades entre si.

No início da calha em degraus as cargas de pressões médias possuem valores próximos de 0 m.c.a., em virtude da cavidade formada pelo lançamento do escoamento quando em contato com os defletores. Porém, como cada defletor possui uma espessura diferente, o escoamento é lançado mais a jusante conforme aumenta a espessura do defletor e, conseqüentemente, maior é a cavidade sem presença de escoamento.

No degrau em que o escoamento impacta o degrau ocorrem cargas de pressões elevadas. Sendo que para uma mesma configuração, conforme aumenta a vazão, o impacto do jato d'água desloca-se para montante, devido à maior massa d'água, fazendo com que o degrau seja preenchido pela lâmina de água, e assim, a carga de pressão média seja alta nessa região.

Após a região de impacto do jato d'água a carga de pressão média para as vazões de 0,100; 0,125 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m decresceram suavemente até a região na qual ocorre a posição de início da aeração da superfície. E a partir da posição de início da aeração superficial total do escoamento, a carga de pressão média tende a estabilizar até o fim calha do vertedouro em degraus.

O comportamento da carga de pressão média da vazão de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m foi semelhante ao comportamento das vazões específicas anteriores até a região de impacto do jato d'água. A partir desta região os valores de carga de pressão média



mantiveram-se praticamente constantes e, posteriormente, a mesma, em virtude do início da aeração da superfície.

Já para as vazões 0,275; 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões médias crescem suavemente logo após o impacto do jato d'água nos degraus e, após as mesmas mantiveram-se praticamente constantes até o fim da calha em degraus, pois a posição de início da aeração da superfície do escoamento ocorre no fim da calha em degraus.

Na Figura 94 está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, respectivamente, o comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 1.

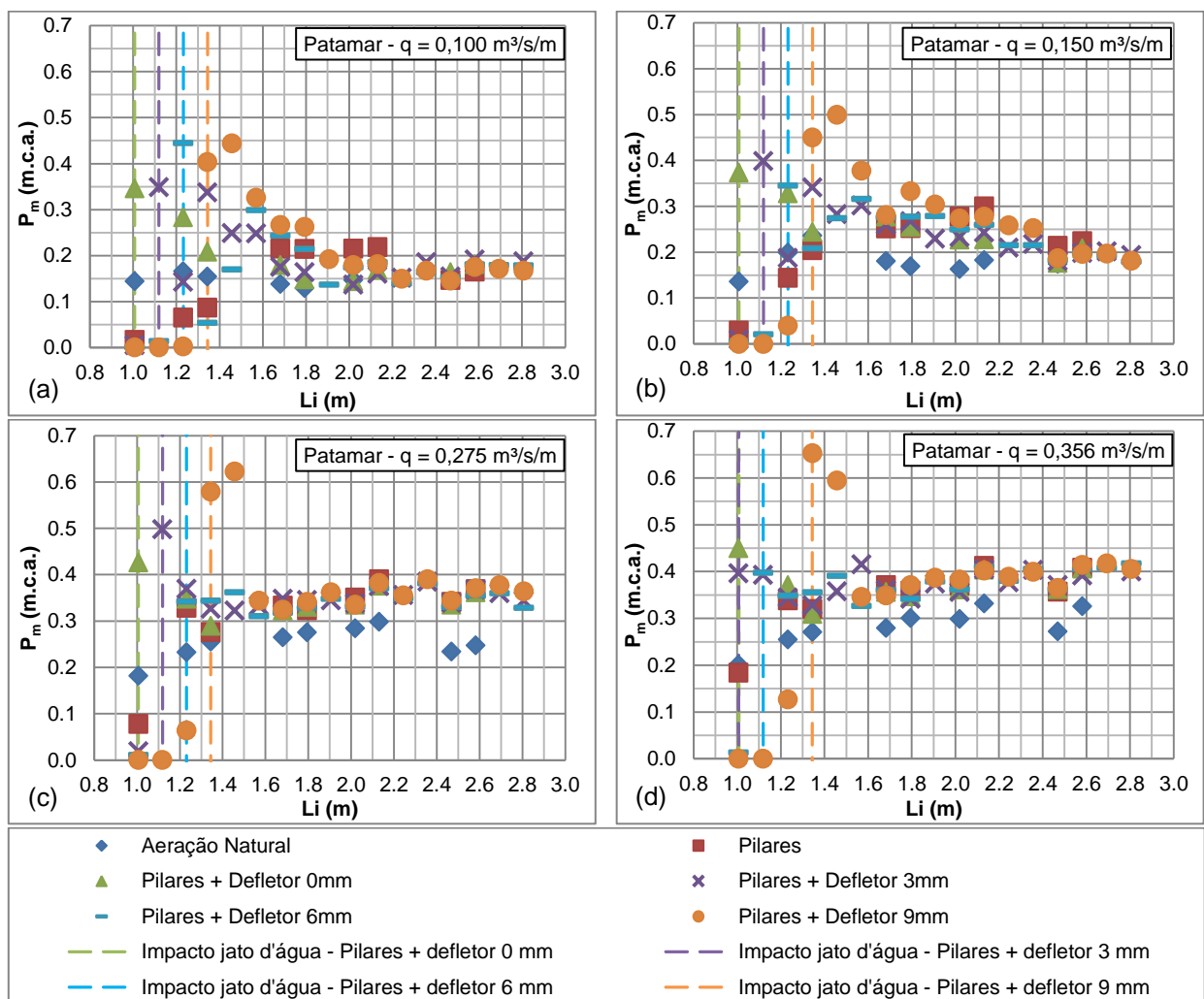


Figura 94 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, (c) vazão específica 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e (d) vazão específica 0,356 m<sup>3</sup>/s/m

A partir da análise do comportamento das pressões médias dos patamares ao longo do vertedouro para aeração induzida verifica-se uma maior dispersão dos valores de carga de pressão até a posição em torno de 1,60 m, em virtude da presença dos dispositivos que permitem a incorporação de ar ao escoamento.

Para a aeração induzida por pilares, os pilares permitem a incorporação de ar a partir das laterais, desta forma, para as vazões específicas entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, os valores de carga de pressão média, até a posição longitudinal em torno de 1,40 m, foram inferiores a aeração natural, indicando que a presença dos pilares influenciou no comportamento do escoamento através da incorporação de ar e, conseqüentemente, nas cargas de pressões médias até essa posição longitudinal. No entanto, nessa mesma região, para as maiores vazões ensaiadas, os valores de carga de pressão média foram superiores a aeração natural e através da visualização do escoamento percebe-se que a aeração do escoamento é menor para as maiores vazões, pois o nível de água é maior e, desta forma, indica-se que a incorporação de ar através dos pilares não é suficiente para as maiores vazões nessa região.

Os defletores com diferentes espessuras, instalados no primeiro degrau, fazem com que o escoamento seja lançado para jusante, formando uma cavidade sem presença de escoamento, onde verifica-se valores de pressão média em torno de 0 m.c.a., com exceção do defletor de 0 mm que, devido a inclinação igual a ogiva, não ocorreu o lançamento do escoamento.

Quando o escoamento impacta o patamar do degrau a carga de pressão é alta nessa região, chegando a valores em torno de 0,35 a 0,65 m.c.a., sendo que os maiores valores foram para o defletor com espessura de 9 mm e os defletores com espessura de 0, 3 e 6 mm apresentaram valores de carga de pressão média próximos entre si. Verifica-se também que conforme aumenta a espessura do defletor o impacto do jato d'água se dá mais para jusante, ou seja, a cavidade sem presença de escoamento é maior.

Para as vazões específicas de 0,100; 0,125 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m observa-se que a região entre as posições longitudinais em torno de 1,60 a 2,10 m apresenta-se dispersa, porém com comportamento similar entre si. Os valores de carga pressão média para a aeração induzida foram superiores a aeração natural e variaram em torno de 0,15 a 0,35 m.c.a., ou seja, pode-se inferir que a incorporação de ar inferior

ao escoamento não influenciou nas pressões médias, sendo que as pressões decresceram a jusante da região em que ocorre a aeração superficial do escoamento. E, como os pilares diminuíram a largura do calha do vertedouro até o primeiro degrau, fez com que a energia cinética do escoamento aumente neste trecho, e, isso, influenciou nas cargas de pressões médias a jusante também.

A jusante da posição longitudinal de 2,10 m, ainda para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressão são muito próximas entre si para todas as configurações de aeração induzida ensaiadas e a aeração natural, pois a partir dessa posição a aeração superficial do escoamento já foi atingida. Os valores de carga de pressão média variam de 0,15 a 0,20 m.c.a., crescendo conforme aumenta a vazão específica.

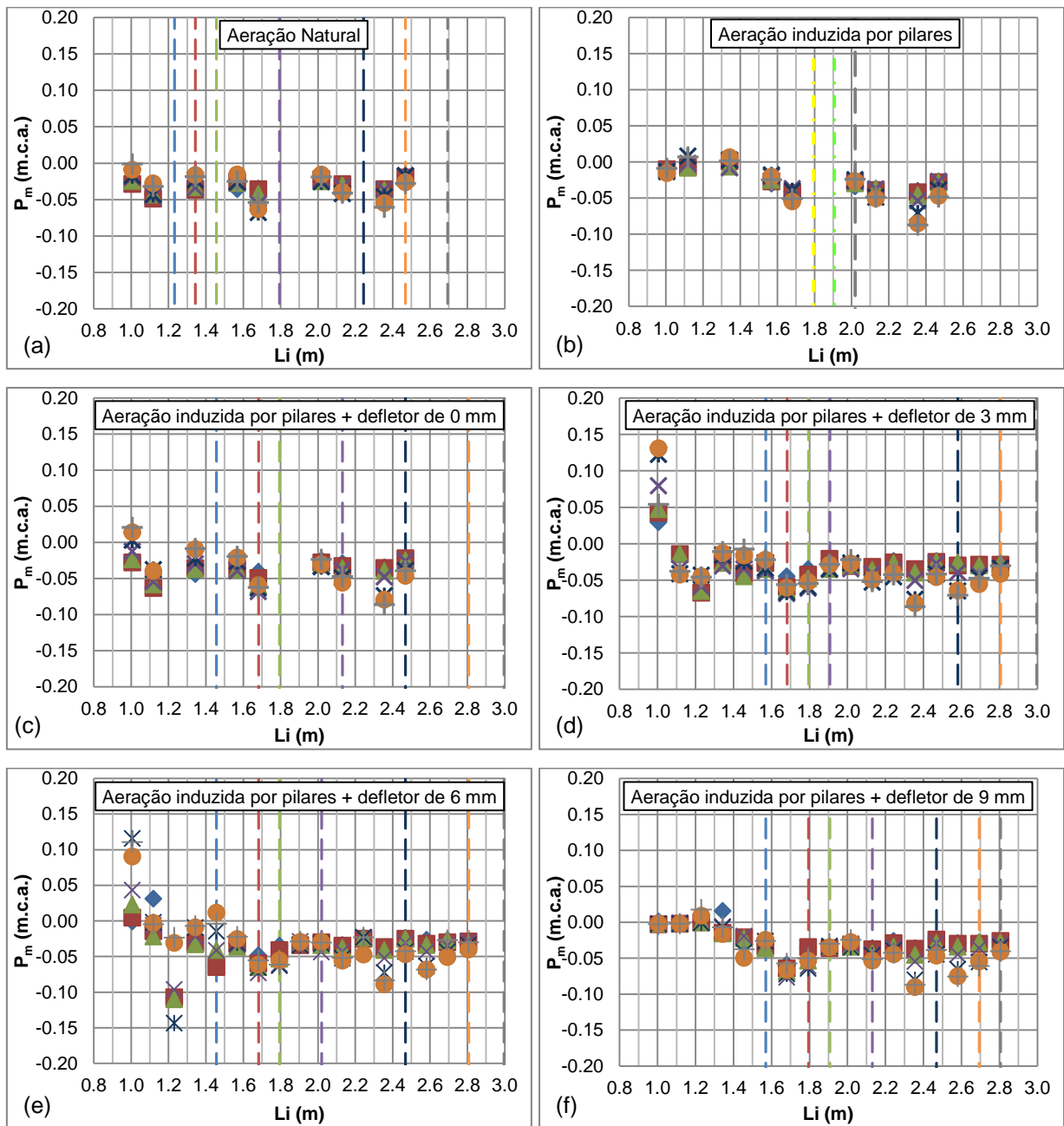
Já para as vazões específicas maiores, entre 0,200 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a carga de pressão média para todas as configurações ensaiadas com aeração induzida foram próximas para todos os patamares dos degraus, a jusante da posição de 1,60 m, mostrando que, a partir desta posição, independentemente do dispositivo utilizado para a incorporação de ar o comportamento das pressões médias não é influenciado. Também observa-se, nesta região, que o escoamento com aeração induzida apresenta cargas de pressões médias superiores a aeração natural, em torno de 0,10 m, indicando que o ar incorporado ao escoamento não amortece as pressões médias e, em virtude da presença dos pilares nas laterais até o primeiro degrau, faz com que a largura da calha diminua e, então a energia cinética aumenta neste trecho, influenciando, também, nas cargas de pressões médias a jusante.

#### **4.2.4 Comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões médias registradas nos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas em função da configuração de ensaio (Figura 95) e da vazão ensaiada (Figura 96), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

Na Figura 95 estão apresentados os comportamentos da pressão média dos espelhos dos degraus do vertedouro e a posição de início da aeração da superfície do escoamento, para todas as vazões ensaiadas, pela posição longitudinal ao longo

da calha, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.



◆ $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 2,945$	■ $q = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 3,556$
▲ $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 4,267$	× $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 5,689$
✖ $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 7,823$	● $q = 0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 9,387$
+ $q = 0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} - F^* = 10,127$	— Aeração da Superfície - $q = 0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
— Aeração da Superfície - $q = 0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	— Aeração da Superfície - $q = 0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
— Aeração da Superfície - $q = 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	— Aeração da Superfície - $q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
— Aeração da Superfície - $q = 0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	— Aeração da Superfície - $q = 0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- - - Aeração da Superfície - $q = 0,100; 0,125; 0,150 \text{ e } 0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	
- - - Aeração da Superfície - $q = 0,275 \text{ e } 0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$	

Figura 95 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm

O comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus para todas as configurações ensaiadas apresentaram-se de maneira semelhante, sendo que a maior diferença encontrada foi na região em que o ar é incorporado na parte inferior do escoamento.

Para a aeração natural, as pressões médias verificadas nos espelhos dos degraus são semelhantes e com valores próximos para todas as vazões ensaiadas, onde os mesmos apresentaram-se valores negativos e praticamente constantes ao longo do vertedouro em degraus.

Através da análise do comportamento da pressão média verificadas nos espelhos dos degraus ao longo do vertedouro para a aeração induzida por pilares, percebe-se que a carga de pressão média, no início da calha em degraus até a posição longitudinal de 1,34 m, é em torno de 0 m.c.a. E, a partir dessa posição longitudinal, a carga de pressão média decresce suavemente até a posição longitudinal em torno de 1,70 m, onde a mesma praticamente estabiliza até o fim da calha em degraus. Indicando que o ar incorporado ao escoamento através das laterais do vertedouro, em virtude da presença dos pilares, é suficiente para que as cargas de pressões negativas sejam amortecidas e se aproximem de 0 m.c.a., apenas nos espelhos iniciais do vertedouro, após o ar é dissolvido e as cargas de pressões diminuem.

Para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm percebe-se que o comportamento das pressões médias foi similar ao comportamento da aeração natural em toda a extensão da calha. As cargas de pressões médias são praticamente estáveis e com valores próximos de 0 m.c.a. e negativos em todos os espelhos dos degraus do vertedouro.

Para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores, na região em que ocorre o lançamento e impacto do escoamento sobre os degraus apresentaram comportamentos distintos, sendo influenciado pela espessura dos defletores e não apresentou um comportamento característico.

Sendo que para a aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, verifica-se que no início da calha em degraus, na posição longitudinal em torno de 1,0 m, as cargas de pressões médias apresentam valores entre 0,03 a 0,13 m.c.a., crescendo conforme a vazão aumenta.

Já para a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, no início da calha em degraus, antes do impacto do jato d'água no degrau, devido ao lançamento do escoamento quando em contato com o defletor, verifica-se que as cargas de pressões médias apresentaram valores positivos e próximos de 0 m.c.a.. Conforme a análise visual do escoamento a região de impacto do jato d'água corresponde à região entre as posições longitudinais de 1,12 a 1,23 m, refletindo em baixas cargas de pressões médias, em torno de -0,10 a -0,15 m.c.a., na posição longitudinal de 1,23 m, para as vazões específicas entre 0,100 a 0,275 m<sup>3</sup>/s/m. No entanto, para as vazões específicas 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a carga de pressão média para a mesma posição longitudinal foi superior às demais vazões específicas, -0,02 m.c.a., podendo estar relacionado com o preenchimento da cavidade do degrau por uma altura maior de lâmina d'água, fazendo com que a sucção na quina do espelho do degrau seja inferior.

E para a aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm, verifica-se que no início da calha em degraus, até a posição longitudinal de 1,34 m, as cargas de pressões médias apresentam valores próximos de 0 m.c.a., para todas as vazões específicas ensaiadas, região a qual ocorreu a cavidade sem presença de escoamento, em virtude do lançamento do jato d'água, quando em contato com o defletor.

Após a região de impacto do jato d'água as cargas de pressões médias foram praticamente estáveis ao longo do vertedouro em degraus, para todas as configurações.

Na Figura 96 está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, o comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as configurações de aeração

induzida ensaiadas. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 2.

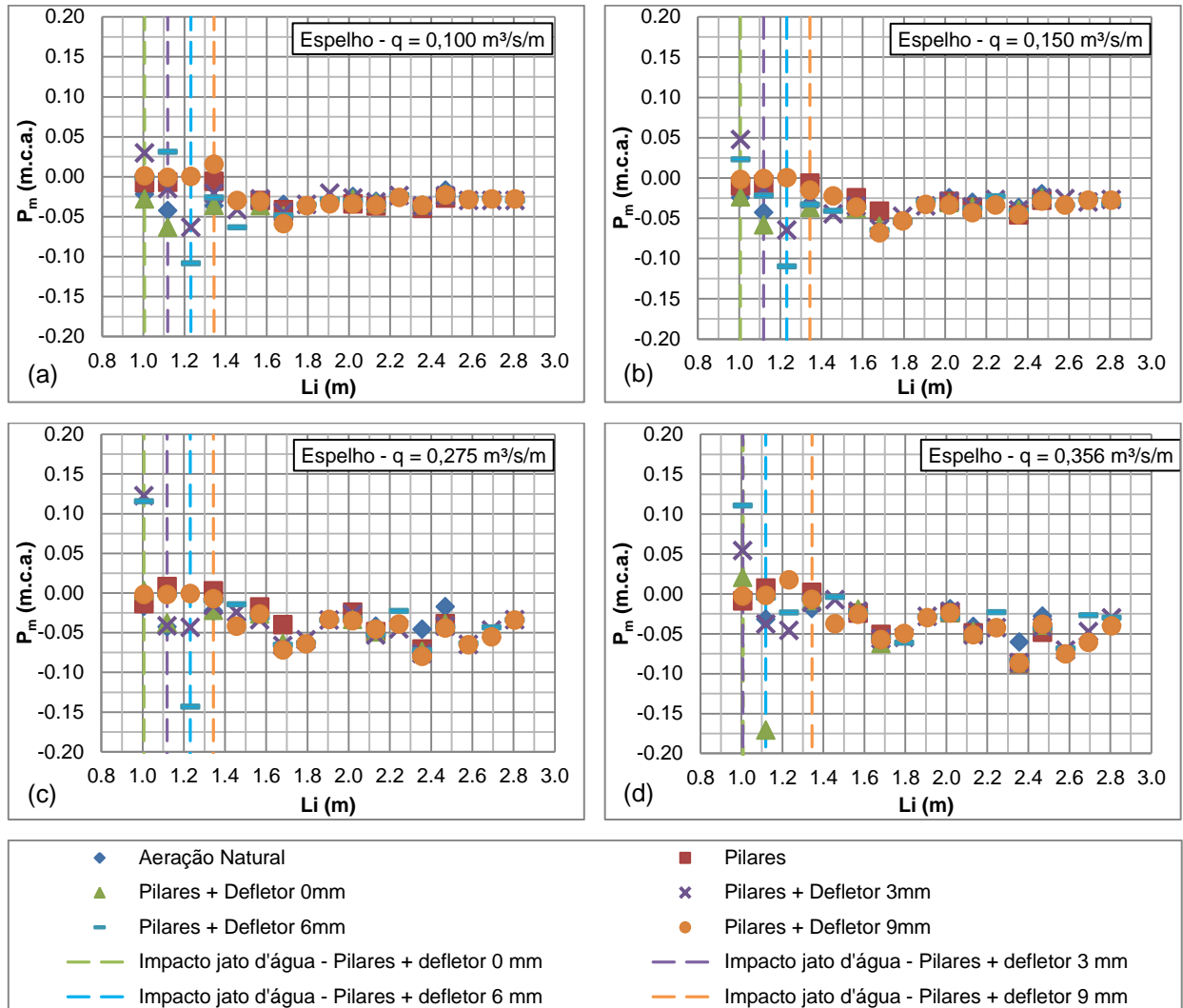


Figura 96 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, (c) vazão específica 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e (d) vazão específica 0,356 m<sup>3</sup>/s/m

Para os espelhos dos degraus do vertedouro as pressões médias se comportam de maneira menos dispersa quando comparada aos patamares.

A maior dispersão dos dados de pressões médias ocorre até a posição em torno de 1,50 m, região onde ocorre o impacto do jato d'água. Sendo que a aeração induzida por pilares e pilares + defletor de 9 mm apresentaram valores próximos de 0 m.c.a. para todas as vazões ensaiadas, mesmo na posição em que o escoamento impactou o degrau. Já para as outras configurações com aeração induzida e

aeração natural verificaram-se valores positivos e negativos, variando de -0,17 a 0,11 m.c.a..

A jusante desta posição os valores de carga de pressão são muito próximos para todas as configurações ensaiadas, inclusive para a aeração natural.

Para as vazões específicas de 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m o comportamento das pressões médias para todas as configurações ensaiadas, a jusante da posição longitudinal de 1,50 m, varia pouco, com valores de carga de pressão média próximos de 0 m.c.a.. Porém, ocorre um pequeno decréscimo da carga de pressão média até a posição de 1,80 m, chegando a valores em torno de -0,05 m.c.a., onde a mesma volta a crescer novamente, e para as menores vazões específicas, as cargas de pressões médias estabilizam com valores próximos a 0 m.c.a., já para as maiores vazões específicas as cargas de pressões médias decresceram, também, na posição longitudinal entre 2,35 a 2,60 m, com valores em torno de -0,08 m.c.a..

Com isso, pode-se dizer que a aeração induzida influenciou o comportamento das pressões médias nos espelhos dos degraus do vertedouro até a posição próxima a 1,50 m, a jusante desta posição a aeração natural e induzida apresentaram valores de pressões médias praticamente iguais.

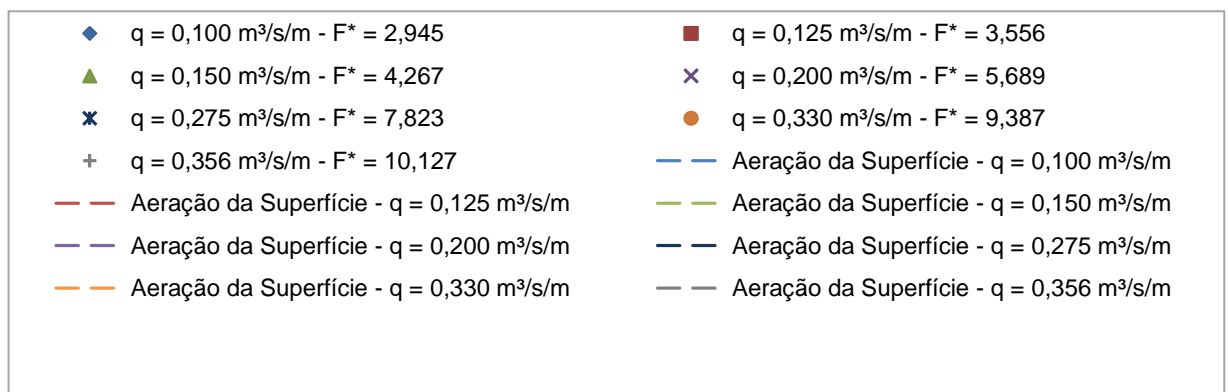
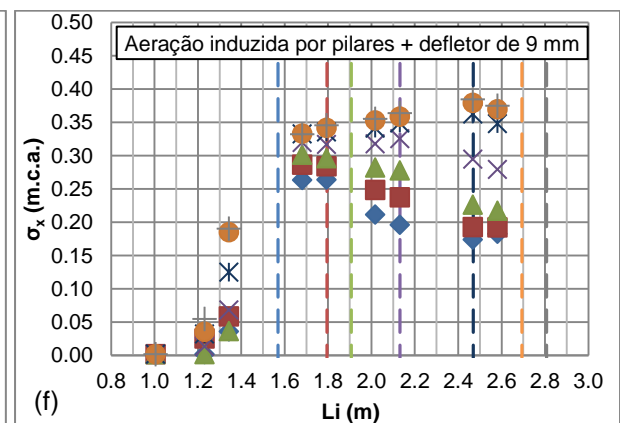
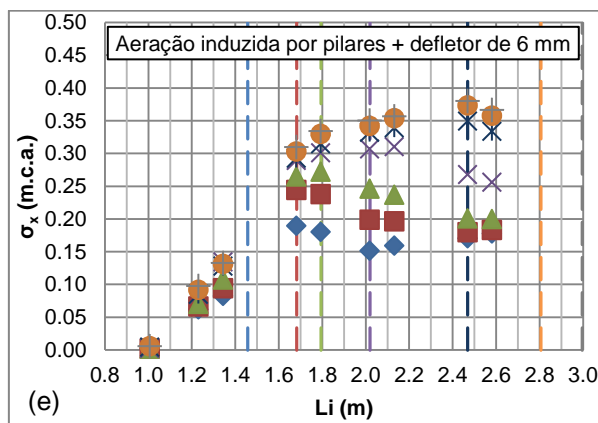
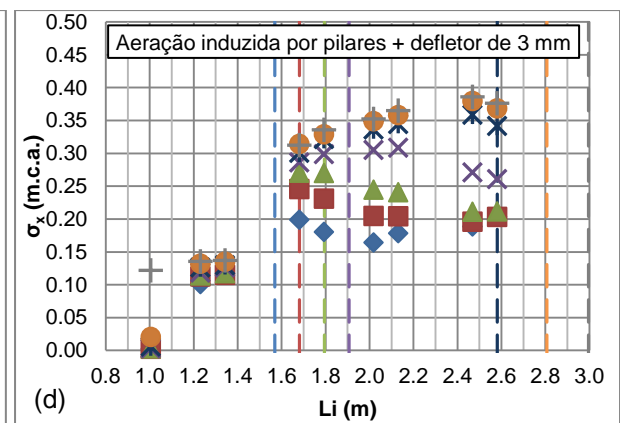
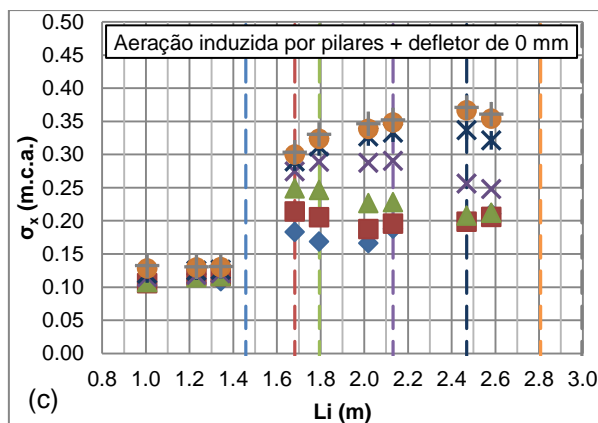
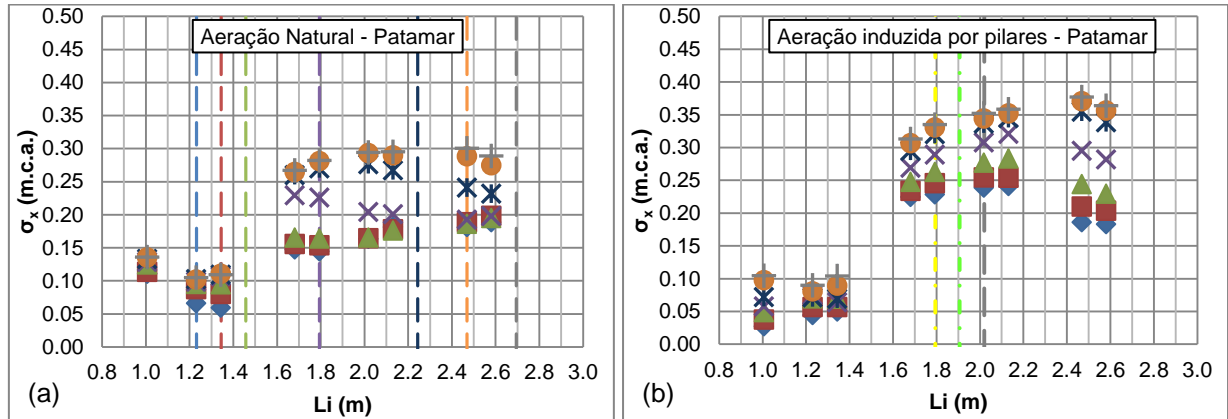
#### **4.2.5 Comportamento das pressões flutuantes dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões flutuantes foram obtidas através da análise estatística das séries de pressões “instantâneas” registradas ao longo do vertedouro em degraus, representando a variação média de pressão em torno da média geral das amostras. As mesmas apresentam-se em função da configuração de ensaio (Figura 97) e da vazão ensaiada (Figura 98), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

Na Figura 97 estão apresentados os comportamentos da flutuação de pressão dos patamares dos degraus do vertedouro e a posição de início de aeração do escoamento, para todas as vazões ensaiadas, pela posição longitudinal ao longo da calha, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e



para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.



- Aeração da Superfície -  $q = 0,100; 0,125; 0,150$  e  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$
- Aeração da Superfície -  $q = 0,275$  e  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Figura 97 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm

Através da análise do comportamento da flutuação de pressão ao longo do vertedouro para aeração natural, percebe-se que as cargas de pressões flutuantes nos patamares, imediatamente a jusante da ogiva do vertedouro, entre as posições longitudinais 1,00 a 1,35 m, assumem valores baixos para todas as vazões específicas ensaiadas e decrescem suavemente nesta região. À medida que a distância da crista do vertedouro aumenta, a carga de flutuação de pressão também aumenta, porém com comportamentos distintos para determinadas vazões.

Para as menores vazões específicas, entre  $0,100$  a  $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , o comportamento ocorre de maneira similar, com valores de carga de flutuação de pressão próximos entre si, sendo que a carga de flutuação de pressão cresce e estabiliza a jusante da aeração total do escoamento. Para as vazões específicas entre  $0,200$  e  $0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , as cargas de flutuação de pressão possuem valores altos na posição em torno de 1,70 m, no entanto, as mesmas decrescem a partir da posição de início da aeração superficial do escoamento. A vazão específica de  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  decresceu até valores de carga de flutuação de pressão próximos ao das vazões específicas inferiores, indicado que o escoamento nesta posição está estabilizado.

Para a aeração induzida por pilares, a carga de flutuação de pressão, imediatamente a jusante da ogiva do vertedouro, também assume valores baixos e praticamente constantes, até a posição longitudinal de 1,35 m, para todas as vazões ensaiadas. Conforme o escoamento se desloca a jusante as cargas de flutuação de pressão crescem para todas as vazões específicas, e, logo após, para as vazões específicas entre  $0,100$  a  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  as cargas de pressões flutuantes decrescem, a partir da aeração total do escoamento, que ocorre em torno da posição longitudinal de 2,36 m, até o final da calha em degraus. Já para as vazões específicas entre  $0,275$  a  $0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , as cargas de pressões flutuantes crescem até o fim da calha em degraus.

Para as configurações de aeração induzida por pilares + defletor 0, 3, 6 e 9 mm, verifica-se que a carga de flutuação de pressão nos primeiros degraus da

calha do vertedouro, até a posição longitudinal em torno de 1,35 m, apresentam comportamentos distintos, em virtude do lançamento e impacto do escoamento nos degraus. Para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm as cargas de pressões flutuantes apresentam valores estáveis e próximos para todas as vazões ensaiadas nesta região. Já para os outros defletores, na região em que não há escoamento os valores de carga de flutuação de pressão foram 0 m.c.a. e na posição do impacto do escoamento no degrau os valores se elevam.

A jusante dessa região os valores para todas as vazões específicas se elevam, sendo que para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões flutuantes decrescem a partir da posição de início de aeração e a partir da aeração total do escoamento, para as vazões entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões flutuantes apresentaram valores próximos e, praticamente, estáveis.

Na Figura 98 está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, comportamento da flutuação de pressões dos patamares dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações ensaiadas de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 3.

A partir da análise do comportamento da flutuação de pressões dos patamares ao longo do vertedouro verifica-se que para a aeração natural e induzida, até a posição de 1,40 m, os valores de flutuação de pressão estão próximos entre si, em torno de 0,10 m.c.a., para todas as vazões ensaiadas, com exceção dos primeiros patamares dos degraus com aeração induzida por pilares e defletor, que, em virtude da cavidade formada pelo lançamento do jato d'água, quando em contato com o defletor, os valores de flutuação de pressão se aproximam de 0 m.c.a. no início da calha em degraus, crescendo até valores 0,10 m.c.a..

De maneira geral, a jusante da posição de 1,60 m os valores de flutuação de pressão cresceram e para as configurações de ensaio com aeração induzida, os valores de carga de flutuação de pressão foram superiores quando comparados com a aeração natural, no entanto, para as menores vazões específicas, em que a posição de início de aeração ocorre no início da calha em degraus e a aeração total do escoamento ocorre ao longo do escoamento, os valores das cargas de flutuação de pressão para aeração induzida decresceram até valores próximos aos valores da aeração natural.

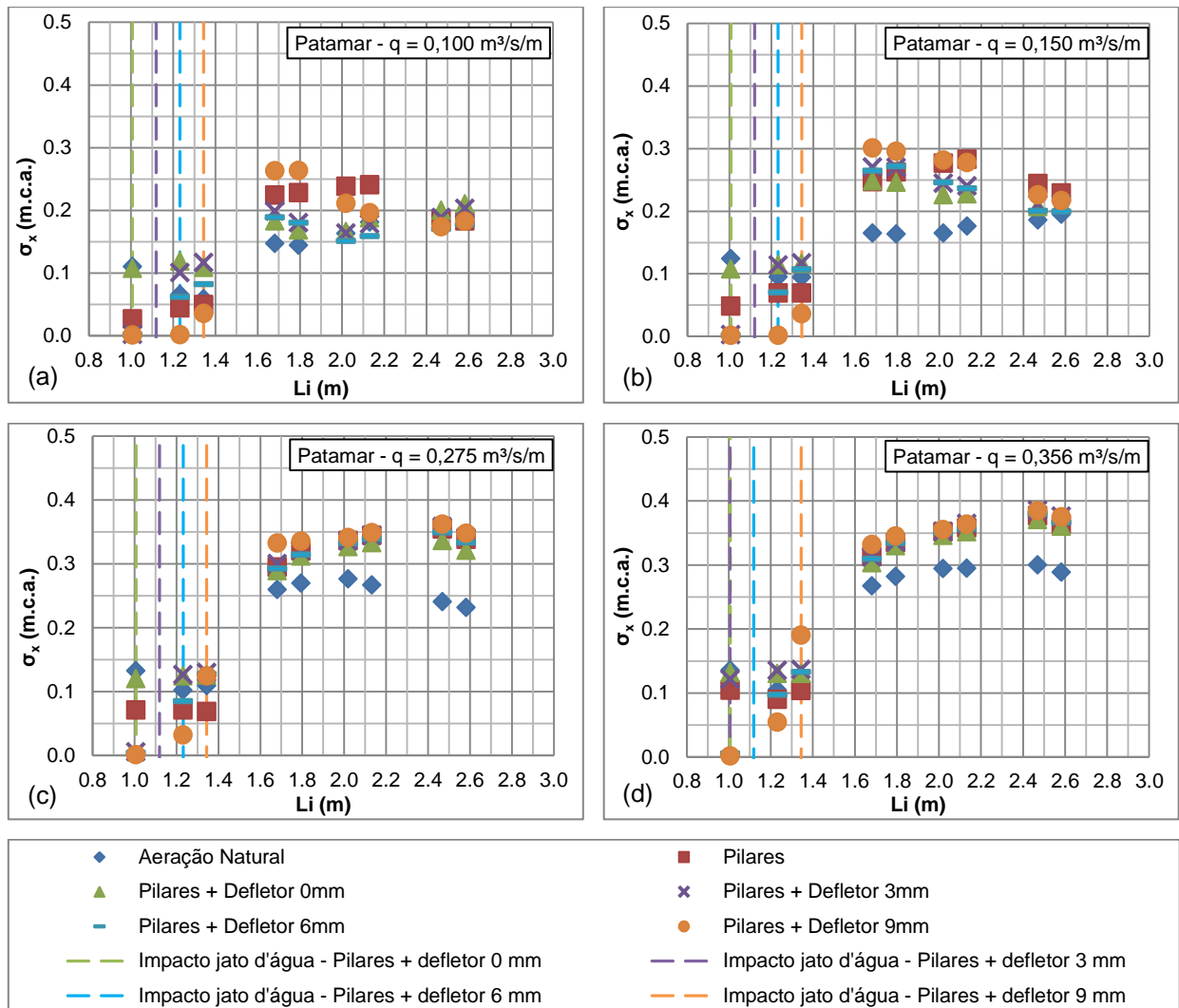


Figura 98 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c) vazão específica  $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (d) vazão específica  $0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Para as vazões específicas de  $0,100$  e  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e aeração induzida por pilares + defletor com espessura de  $0, 3$  e  $6 \text{ mm}$ , a partir da posição  $2,0 \text{ m}$ , os valores da flutuação de pressão se aproximam dos valores de flutuação de pressão da aeração natural, valores estes entre  $0,15$  a  $0,20 \text{ m.c.a.}$ . E, a partir da posição de  $2,40 \text{ m}$ , a aeração induzida por pilares e pilares + defletor de  $9 \text{ mm}$ , também, apresentam valores de flutuação de pressão próximos da aeração natural, juntamente com as outras configurações, em torno de  $0,20 \text{ m.c.a.}$  Já para a vazão específica de  $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  os valores de flutuação de pressão para todas as configurações da aeração induzida se aproximaram da aeração natural apenas no fim da calha em degraus, a partir da posição de  $2,40 \text{ m}$ .

Para as vazões superiores a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m os valores de flutuação de pressão para a aeração induzida foram superiores a aeração natural, em torno de 0,10 m.c.a., em todos os patamares dos degraus, da região compreendida entre as posições longitudinais de 1,60 a 2,60 m, em virtude da posição de início de aeração ocorrer mais a jusante e a aeração total do escoamento não se desenvolveu ao longo da calha, devido à altura da calha do vertedouro.

#### **4.2.6 Comportamento das pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas em função da configuração de ensaio (Figura 99) e da vazão ensaiada (Figura 100), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

Na Figura 99 estão apresentados os comportamentos da flutuação de pressão dos espelhos dos degraus do vertedouro e a posição de início de aeração do escoamento, para todas as vazões ensaiadas, pela posição longitudinal ao longo da calha, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.

Através da análise do comportamento da flutuação de pressão do espelho do degrau ao longo do vertedouro para aeração natural, percebe-se que a carga de flutuação de pressão assume comportamentos distintos para determinadas vazões, porém para o primeiro espelho do degrau, todas as vazões específicas apresentaram valores próximos de flutuação de pressão.

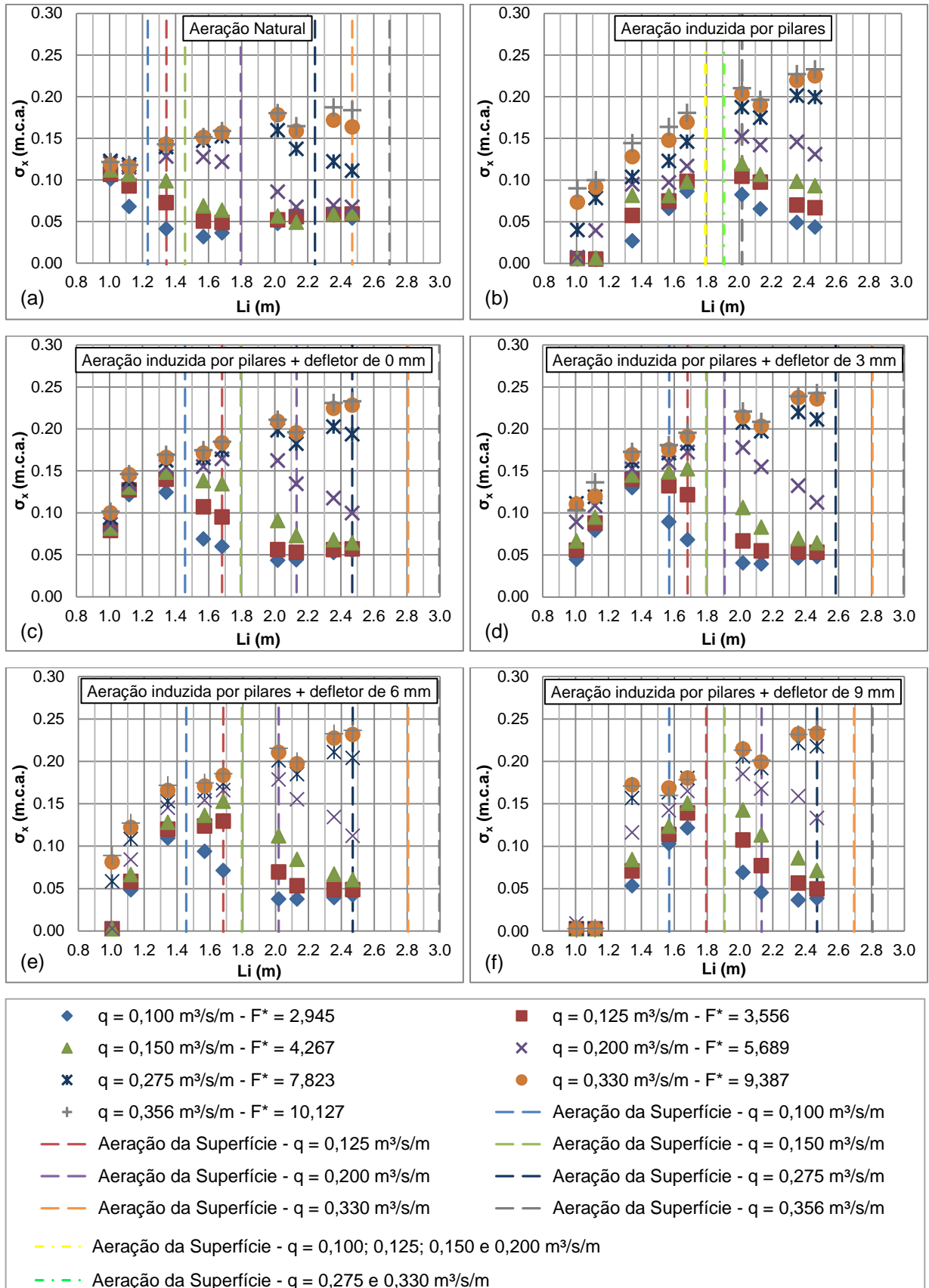


Figura 99 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, (b) aeração induzida por pilares, (c) aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, (d) aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, (e) aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm e (f) aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm

Após esta região, para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões flutuantes decrescem, antes da posição de início de aeração, até a posição longitudinal em torno de 1,70 m e, após, estabilizam com valores próximo entre si, também, anterior à posição em que ocorre a aeração total do escoamento. Já para a vazão específica de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m a carga de flutuação de pressão se mantém praticamente constante até a posição de início da aeração superficial, onde a partir desta, a carga de flutuação de pressão decresce até valores próximos a carga de flutuação das vazões inferiores, onde estabiliza. Para as vazões específicas entre 0,275 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões flutuantes crescem até a posição de início de aeração e a partir da mesma decrescem, no entanto, como a aeração superficial ocorreu no fim da calha, as cargas de pressões continuaram crescendo.

Para a aeração induzida por pilares a carga de flutuação de pressão, imediatamente a jusante da ogiva do vertedouro, assume valores baixos, sendo que conforme aumenta a vazão específica, a carga de flutuação de pressão também cresce para uma mesma posição longitudinal. Já em relação à posição longitudinal ao longo da calha em degraus, a carga de flutuação de pressão cresce, até a posição longitudinal em torno de 2,00 m, para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, decrescendo a partir desta posição, em virtude da posição de início da aeração da superfície do escoamento, que ocorre na posição longitudinal de 1,80 m, e para as vazões específicas entre 0,275 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a carga de flutuação de pressão cresce suavemente até o final da calha em degraus, pois o início da aeração da superfície ocorreu mais a jusante.

O comportamento da flutuação de pressão dos espelhos dos degraus do vertedouro para a aeração induzida por pilares + defletor de 0, 3, 6 e 9 mm são similares, sendo que a maior diferença ocorre no início da calha em degraus, na região que ocorre o lançamento e impacto do jato d'água nos degraus.

As cargas de flutuação de pressão crescem até a região em que ocorre a posição de início de aeração do escoamento e, posteriormente, decrescem. No entanto, esse comportamento pode ser visualizado apenas para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, pois para as maiores vazões específicas as posições de início de aeração ocorrem mais a jusante e as cargas de pressões flutuantes crescem até o fim da calha em degraus.

Na Figura 100 está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, o comportamento da flutuação de pressões dos espelhos dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações ensaiadas de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 4.

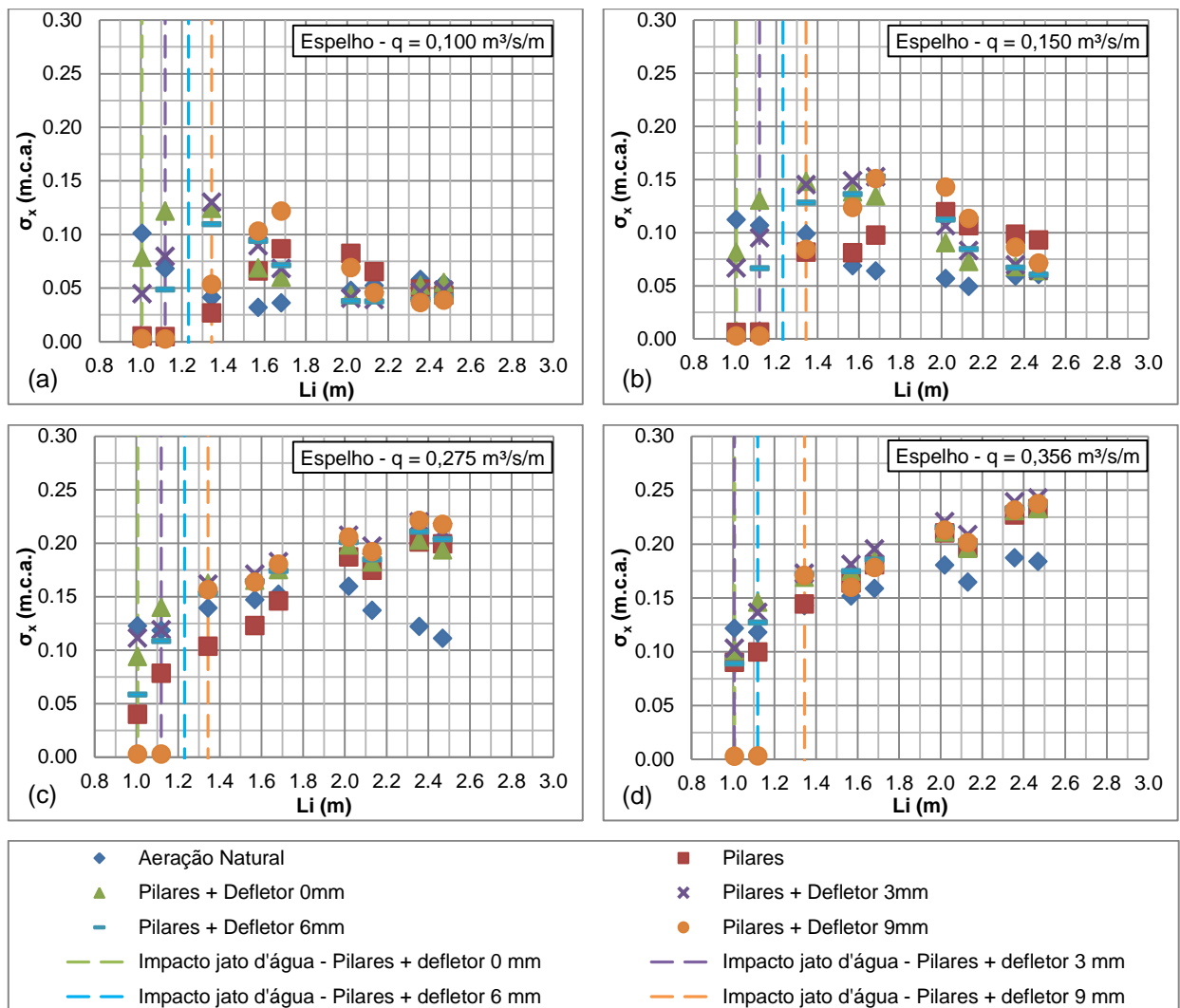


Figura 100 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, (c) vazão específica 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e (d) vazão específica 0,356 m<sup>3</sup>/s/m

A partir da análise do comportamento das flutuações de pressões dos espelhos ao longo do vertedouro em degraus verifica-se que para as vazões específicas de 0,100; 0,125 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, a aeração induzida não apresentou um comportamento definido para todas as configurações ensaiadas, entretanto apresentou valores próximos aos valores da aeração natural. Os primeiros espelhos



dos degraus do vertedouro com aeração induzida, apresentaram flutuações de pressões com valores entre 0 e 0,05 m.c.a., crescendo até valores em torno de 0,15 m.c.a., em diferentes posições ao longo do vertedouro, variando de 1,30 a 1,70 m, conforme a configuração. Posteriormente, a carga de flutuação de pressão voltou a decrescer chegando a valores próximos a 0,05 m.c.a.

As cargas de flutuação de pressões para os espelhos dos degraus do vertedouro com aeração induzida e vazões específicas entre 0,200 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m apresentaram valores próximos aos valores da aeração natural até a posição de 1,60 m, onde os mesmos cresceram de valores próximos de 0 até 0,20 m.c.a.. E após a posição de 1,60 m as cargas de flutuação de pressões para as diferentes configurações de aeração induzida foram em torno de 0,10 m.c.a. superiores aos valores de carga de flutuação de pressão da aeração natural.

#### **4.2.7 Comportamento das pressões extremas dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

O conhecimento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, representando as pressões mínimas, e 99,0% e 99,9%, representando as pressões máximas, possibilita que se tenha uma estimativa da tendência do valor mínimo e máximo que as pressões podem atingir, conforme Lopardo (1986). Apesar das pressões extremas ocorrerem durante uma pequena parcela do tempo, podem trazer danos às estruturas, portanto justifica-se o conhecimento das mesmas para o dimensionamento das estruturas hidráulicas.

Com isso, serão apresentadas as pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, representando as pressões mínimas, e 99,0% e 99,9%, representando as pressões máximas, dos patamares e espelhos dos degraus ao longo do vertedouro.

##### **4.2.7.1 Comportamento das pressões extremas mínimas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões extremas mínimas com 0,1% e 1,0% dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas, respectivamente, em função

da configuração de ensaio (Figura 101 e Figura 102) e da vazão ensaiada (Figura 103 e Figura 104), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

A Figura 101 e a Figura 102 apresentam o comportamento das pressões extremas mínimas com 0,1% e 1,0% de probabilidade de não-excedência, respectivamente, dos patamares dos degraus ao longo do vertedouro, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.

A partir na análise do comportamento das pressões extremas mínimas com probabilidade de 0,1% e 1,0% de não-excedência, verificadas no patamar dos degraus do vertedouro, para a aeração natural e as diferentes configurações de aeração induzida, percebe-se que, no início da calha em degraus, até a posição longitudinal em torno de 1,35 m, as cargas de pressões mínimas apresentam valores oscilando em torno de 0 m.c.a., porém em determinadas posições longitudinais as cargas de pressões mínimas alcançam valores em torno de -0,10 m.c.a. até 0,20 m.c.a. para ambas probabilidades. E para a aeração induzida por pilares + defletores de 6 e 9 mm, os valores de carga de pressão nessa região alcançam valores superiores na posição longitudinal em que o jato impacta os degraus do vertedouro.

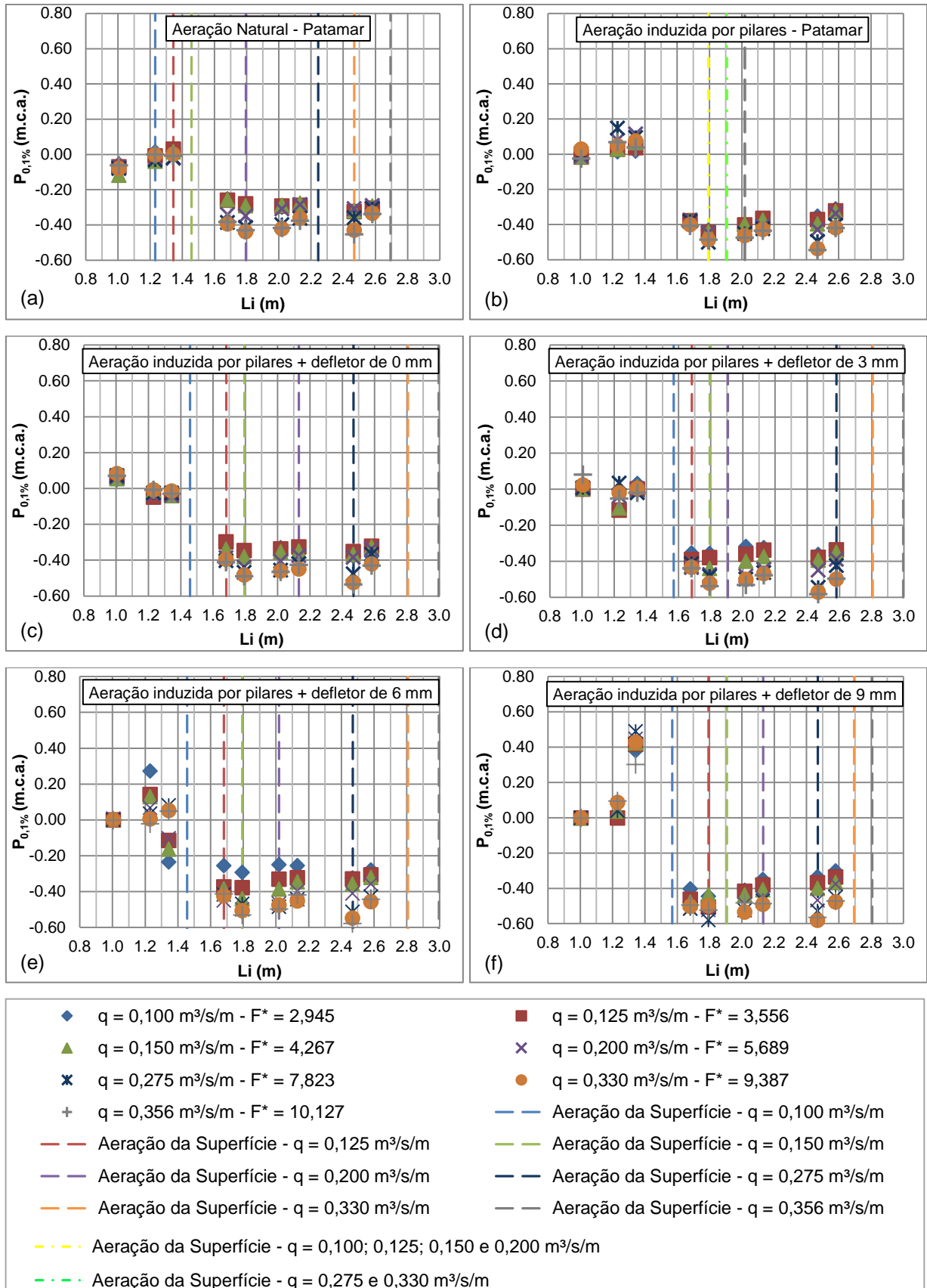


Figura 101 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

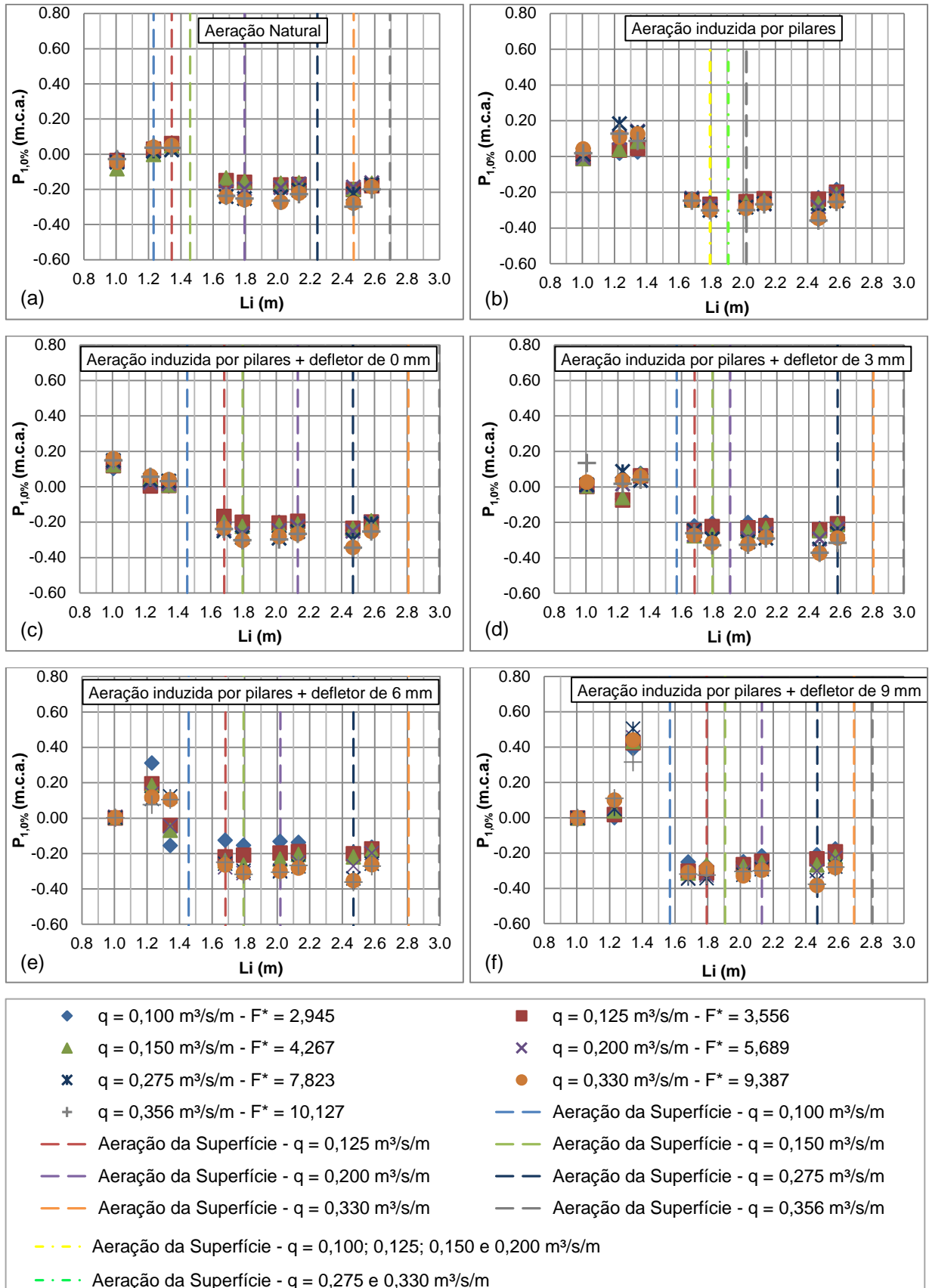


Figura 102 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

Para a aeração natural, na região entre a posição longitudinal de 1,70 a 2,60 m, as cargas de pressões extremas mínimas, para as vazões entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, apresentaram valores próximos entre si e, praticamente, estáveis ao longo dessa região. Isso ocorre, pois a posição de início de aeração para as vazões específicas entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m ocorre no início da calha em degraus, a montante dessa região. Já para as vazões específicas superiores as cargas de pressões médias apresentam valores inferiores às cargas de pressões mínimas encontradas para as vazões específicas entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m. Porém, a partir da região em que ocorre a posição de início de aeração, as cargas de pressões mínimas crescem até valores próximos das cargas de pressões extremas mínimas das vazões específicas inferiores.

Na região entre as posições longitudinais de 1,70 a 2,60 m, para a aeração induzida por pilares, as cargas de pressões extremas mínimas apresentam valores próximos para todas as vazões específicas ensaiadas e a aeração superficial do escoamento ocorre em posições longitudinais próximas para todas as vazões específicas.

Para as configurações de aeração induzida por pilares + defletor de 0, 3, 6 e 9 mm, na região entre 1,70 a 2,60 m, o comportamento foi semelhante. As menores vazões específicas, normalmente 0,100 e 0,125 m<sup>3</sup>/s/m, apresentam valores de carga de pressão extrema mínima praticamente estável nessa região. Já para as maiores vazões específicas os valores de carga de pressão extrema mínima são inferiores e também oscilam pouco em relação à posição longitudinal, no entanto para as vazões em que a posição de início da aeração superficial ocorre nesta região, as cargas de pressões crescem até valores próximos as cargas de pressões extremas mínimas das vazões específicas de 0,100 e 0,125 m<sup>3</sup>/s/m.

Na Figura 103 e na Figura 104 estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, o comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0%, respectivamente, dos patamares dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações ensaiadas de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 5.

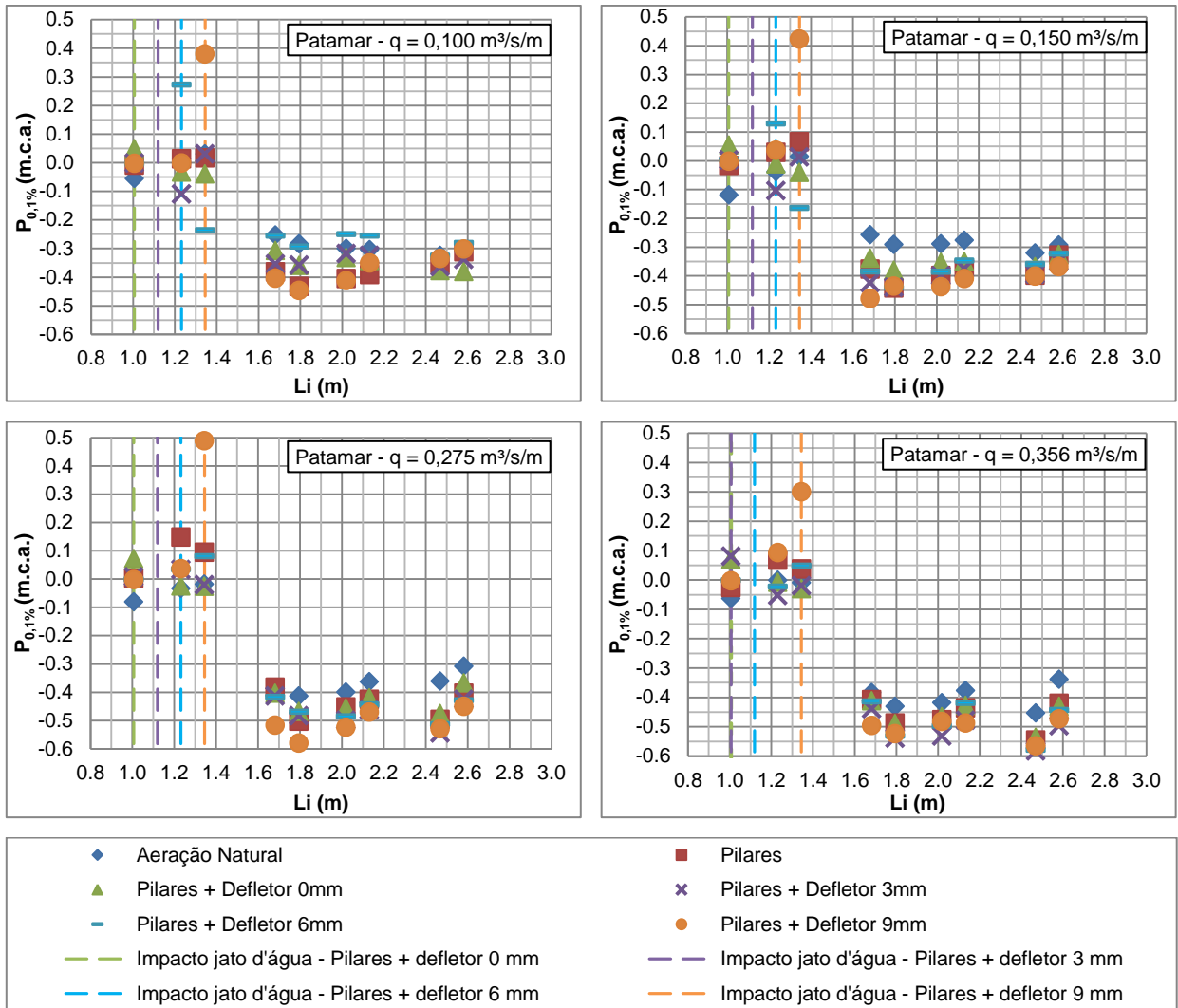


Figura 103 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica 0,150  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c) vazão específica 0,275  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (d) vazão específica 0,356  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

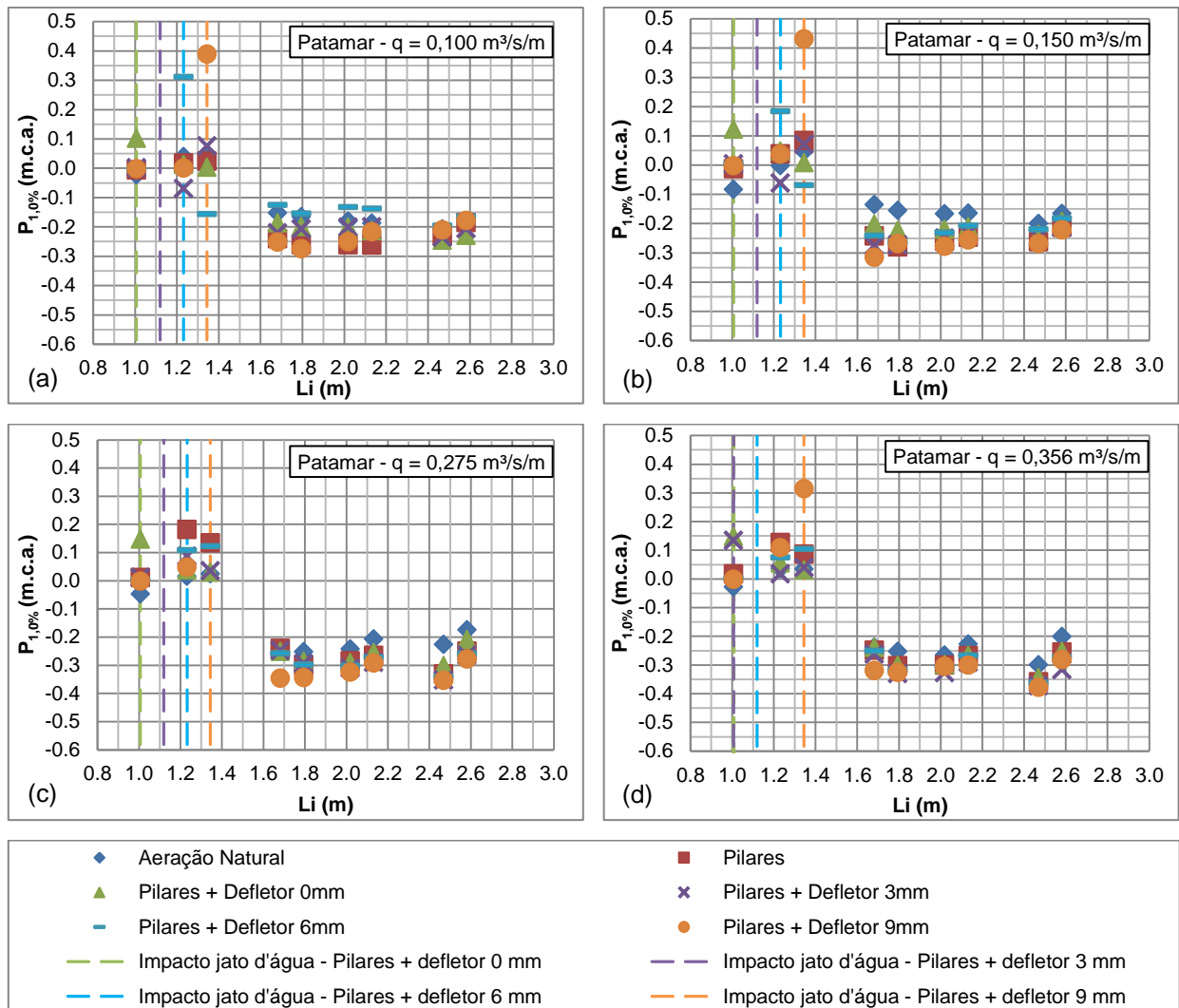


Figura 104 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c) vazão específica  $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (d) vazão específica  $0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

As pressões extremas mínimas com probabilidade de 0,1% e 1,0% de não-excedência se comportam de modo semelhante, porém as pressões com probabilidade de 0,1% de não-excedência apresentam cargas de pressões menores.

A partir da análise do comportamento das pressões mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos patamares ao longo do vertedouro para aeração natural e as diferentes configurações de aeração induzida, verifica-se que até a posição de 1,35 m os valores de carga de pressão mínimas estão em torno de 0 m.c.a., com exceção dos patamares dos degraus em que o jato d'água impactou o degrau, principalmente, para as configurações com aeração induzida por pilares + defletores de 6 e 9 mm, em que o jato d'água possui maior energia.

Após a posição de 1,60 m, tanto para a aeração natural, quanto para as diferentes configurações da aeração induzida, as pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% decresceram para valores entre - 0,30 a - 0,60 m.c.a., e as pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 1,0% decresceram para valores entre - 0,20 a - 0,40 m.c.a., sendo que conforme a vazão específica aumenta as cargas de pressões mínimas decrescem.

As configurações de aeração induzida ensaiadas apresentaram valores de carga de pressão mínima próximos entre si, porém, os valores foram inferiores a aeração natural, de maneira geral, em torno de 0,10 m.c.a.. Para as vazões específicas 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, posterior a posição longitudinal em torno de 2,40 m, ou seja, após a região em que ocorre a aeração superficial do escoamento, as pressões extremas mínimas se aproximaram da aeração natural. No entanto, conforme a vazão específica aumenta a posição em que ocorre a aeração superficial se desloca para jusante, com isso, para as diferentes configurações de aeração induzida, as cargas de pressões extremas mínimas são inferiores a aeração natural até o fim da calha em degraus.

#### **4.2.7.2 Comportamento das pressões extremas mínimas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões extremas mínimas com 0,1% e 1,0% dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas, respectivamente, em função da configuração de ensaio (Figura 105 e Figura 106) e da vazão ensaiada (Figura 107 e Figura 108), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

A Figura 105 e Figura 106 apresenta o comportamento das pressões extremas mínimas com 0,1% e 1,0% de probabilidade de não-excedência, respectivamente, dos espelhos dos degraus ao longo do vertedouro, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.



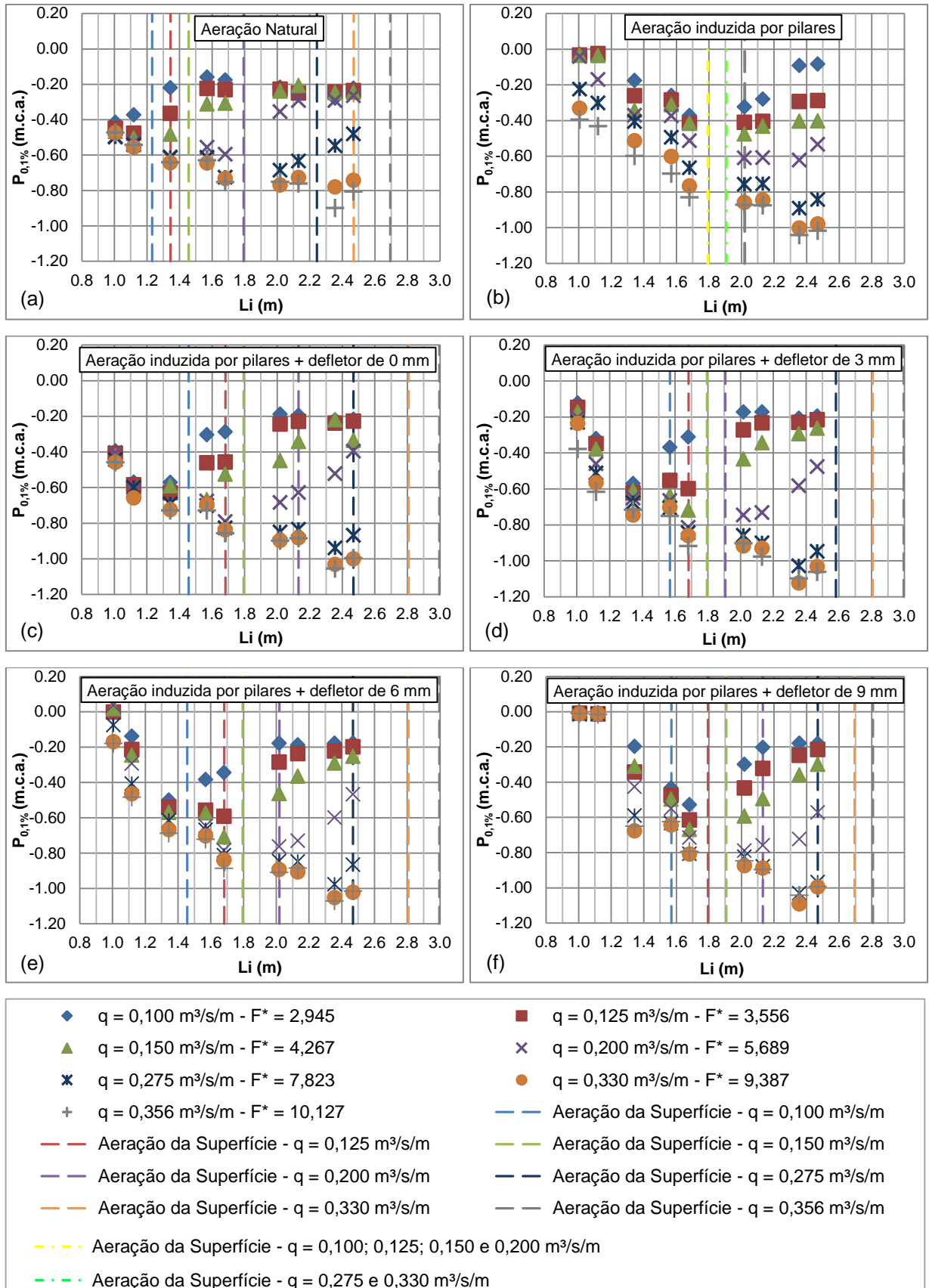


Figura 105 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

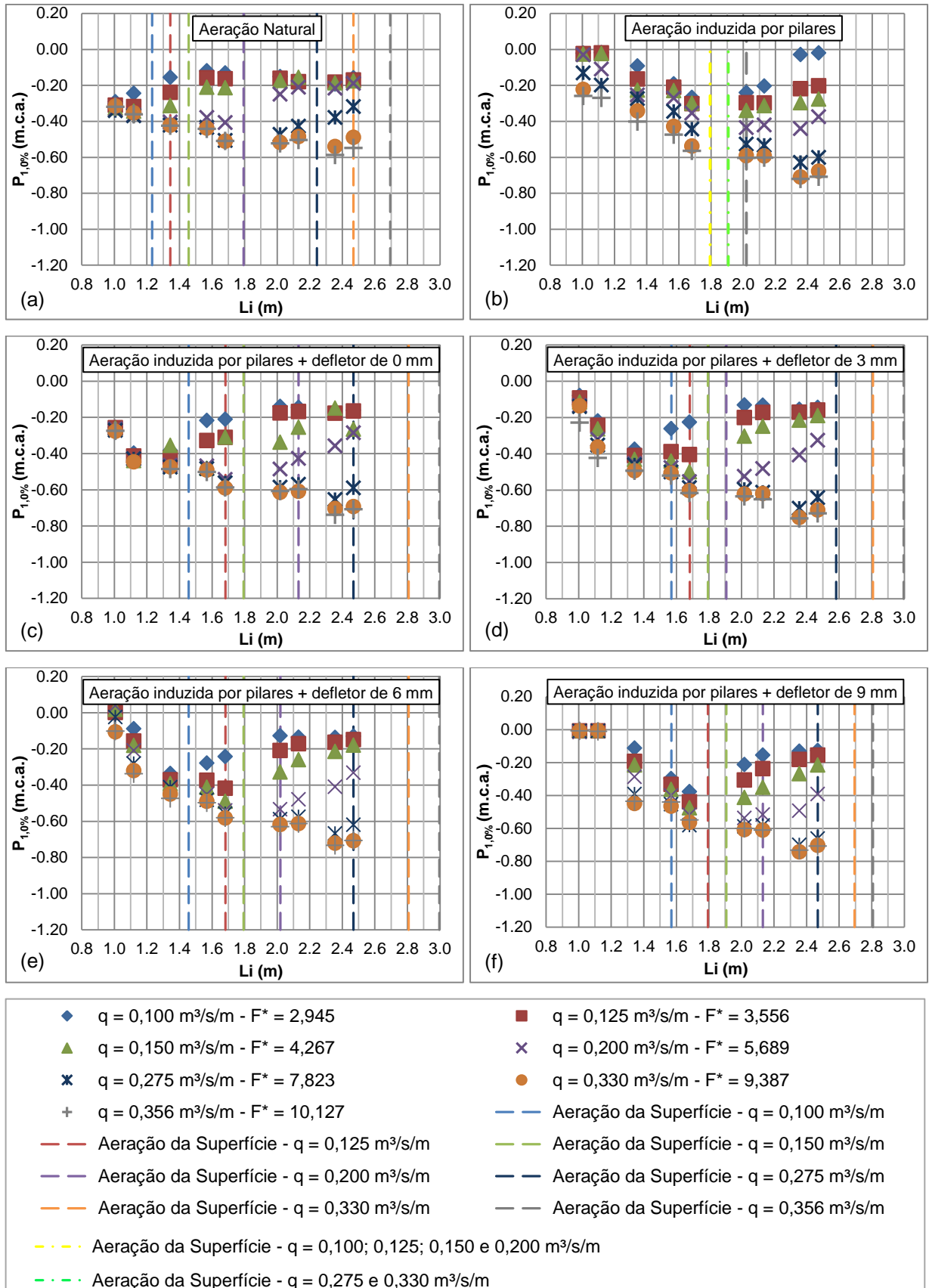


Figura 106 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

A partir da análise do comportamento do escoamento ao longo do vertedouro para a aeração natural, percebe-se que para todas as vazões ensaiadas as cargas de pressões mínimas possuem valores iguais na posição longitudinal de 1,0 m, ou seja, no primeiro degraus do vertedouro.

Posteriormente, para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões mínimas crescem, a partir da posição de início de aeração e, estabilizam a partir da posição longitudinal de 2,0 m, indicando que o escoamento está totalmente desenvolvido.

A vazão específica de 0,275 m<sup>3</sup>/s/m também cresce a partir da posição de início de aeração superficial do escoamento, no entanto, como a aeração superficial ocorre no fim da calha em degraus o escoamento não estabilizou.

Já para as vazões específicas 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressão extrema mínima decrescem até o fim da calha em degraus, pois a aeração natural do escoamento ocorreu no fim da calha em degraus.

Para a aeração induzida por pilares, percebe-se que para todas as vazões específicas as cargas de pressões mínimas decrescem e, a partir da aeração superficial do escoamento as mesmas crescem, porém, como para as vazões específicas entre 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m a posição de início de aeração ocorreu no fim da calha, as cargas de pressões extremas mínimas apenas decresceram ao longo da calha.

As cargas de pressões extremas comportam-se de maneira semelhante para as configurações de aeração induzida por pilares e defletores, sendo que até a posição longitudinal em torno de 1,35 m, as cargas de pressões mínimas decrescem gradativamente, para todas as vazões específicas ensaiadas.

E a partir da posição de início de aeração, as vazões específicas entre 0,100 e 0,200 m<sup>3</sup>/s/m crescem, sendo que para as vazões entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões extremas mínimas estabilizam quando o escoamento está totalmente desenvolvido em torno de um mesmo valor da carga de pressão. Já para as vazões específicas de 0,275 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões mínimas decrescem até o fim da calha em degraus, devido a posição de início de aeração ocorrer no fim da calha em degraus.

Na Figura 107 e na Figura 108 estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, o comportamento das pressões extremas mínimas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% e

1,0%, respectivamente, dos espelhos dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações ensaiadas de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  encontram-se no Apêndice 6.

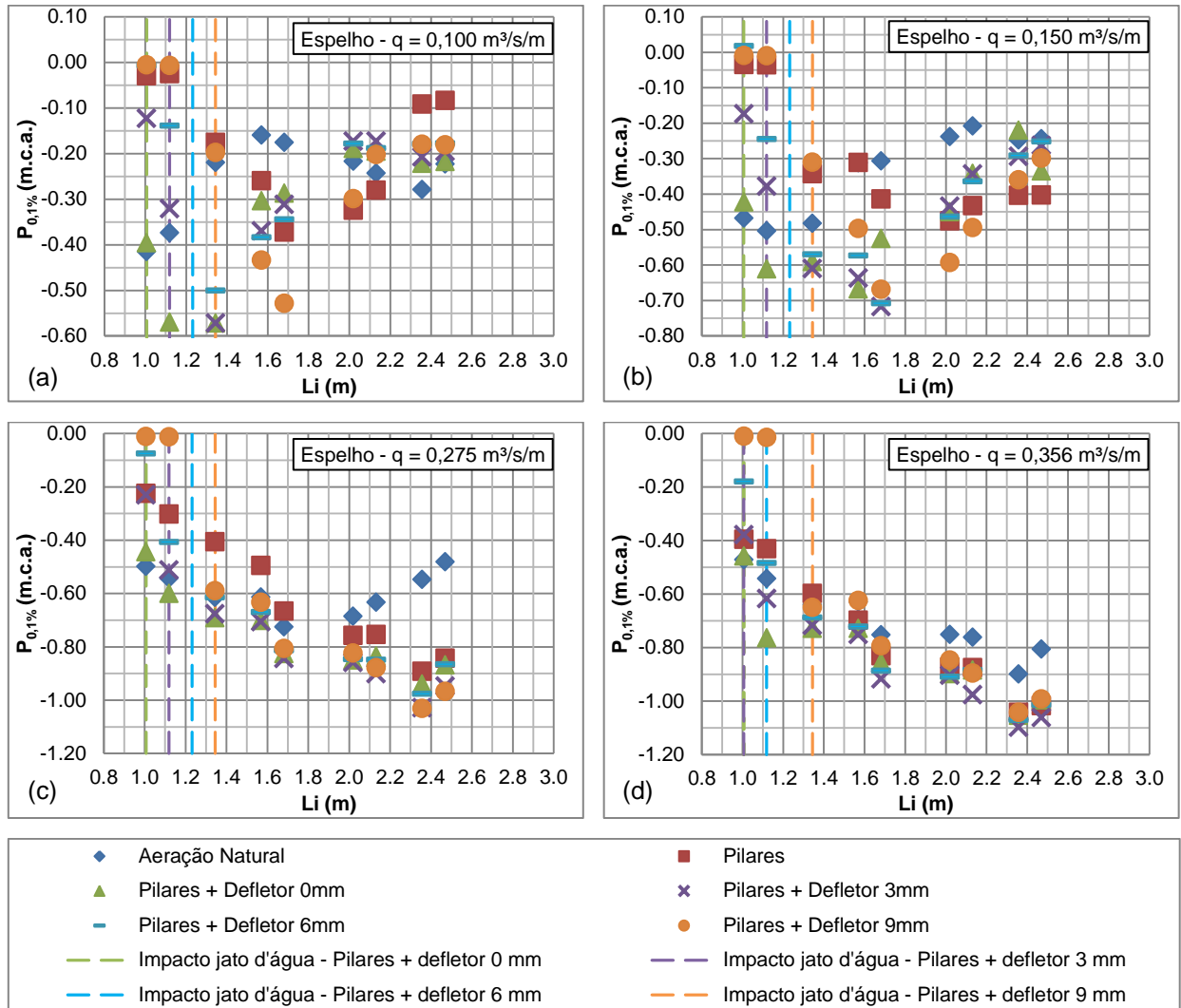


Figura 107 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica 0,150  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c) vazão específica 0,275  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (d) vazão específica 0,356  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

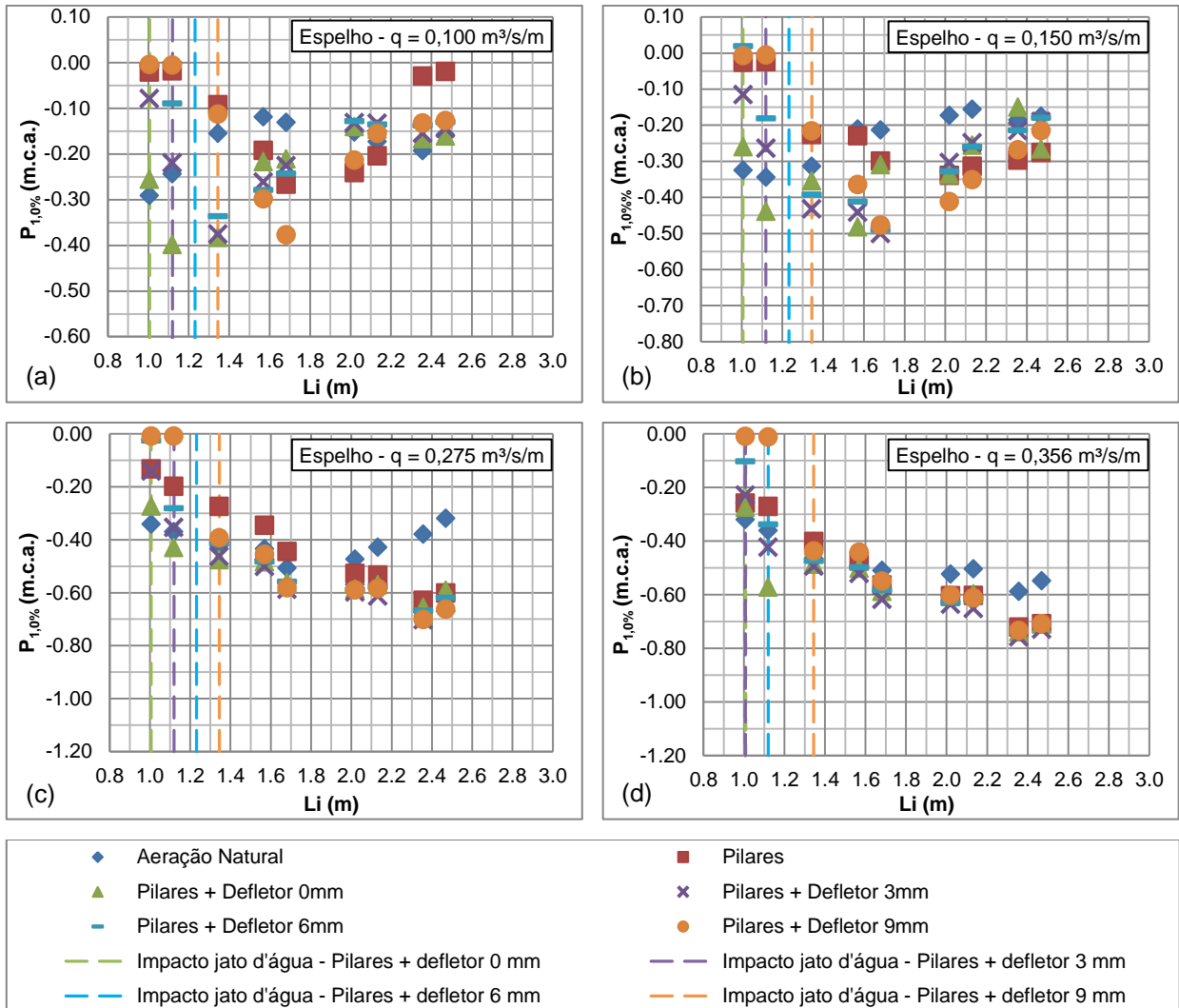


Figura 108 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, (c) vazão específica 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e (d) vazão específica 0,356 m<sup>3</sup>/s/m

A partir da análise do comportamento das pressões mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos espelhos ao longo do vertedouro para aeração natural, verifica-se que as cargas de pressão mínimas até a região da posição de início da aeração decrescem e, posteriormente, tendem a se estabilizar em torno de um valor. Como a posição de início de aeração se desloca para jusante conforme aumenta a vazão específica, os menores valores de carga de pressão mínima ocorrem para a maior vazão ensaiada.

Para a aeração induzida, o comportamento das pressões mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e 1,0% dos espelhos, até a posição de 1,10 m, apresentou valores mais dispersos e superiores a aeração natural, com exceção da aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, para todas as vazões

ensaiadas, e a aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm, para as vazões específicas de 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, os quais apresentaram valores próximos a aeração natural.

Para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, a região entre 1,10 m a 1,50 m, os valores de carga de pressão para aeração induzida por pilares e pilares + defletor de 9 mm aproximaram-se da aeração natural. E após a posição de 1,50 m os valores foram mais dispersos e inferiores aos valores de pressão extrema mínima da aeração natural.

Para a aeração induzida por pilares + defletor 0, 3 e 6 mm os valores de carga de pressão mínima foram inferiores à natural, em torno de 0,20 a 0,40 m.c.a., para as pressões associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1%, e em torno 0,10 a 0,20 m.c.a., para as pressões associadas à probabilidade de não-excedência de 1,0%, até a posição de 2,0 m para as vazões específicas de 0,100 e 0,125 m<sup>3</sup>/s/m, e até a posição 2,30, para a vazão específica de 0,150 m<sup>3</sup>/s/m.

Após a posição longitudinal de 2,0 m, para as vazões específicas entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m e todas as configurações de aeração induzida ensaiadas, as cargas de pressões extremas mínimas se aproximaram da aeração natural, em virtude do escoamento estar totalmente aerado para as diferentes configurações de aeração induzida.

Para as vazões específicas superiores a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, após a posição em torno de 1,60 m, as cargas de pressões para aeração induzida foram inferiores a aeração natural em aproximadamente 0,20 m.c.a., e após a posição de 2,0 m, essa diferença aumentou, chegando a valores em torno 0,40 m.c.a., devido à posição de início da aeração ocorrer mais a jusante.

#### **4.2.7.3 Comportamento das pressões extremas máximas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões extremas máximas com 99,0% e 99,9% dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas, respectivamente, em função da configuração de ensaio (Figura 109 e Figura 110) e da vazão ensaiada (Figura 111 e Figura 112), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

A Figura 109 e a Figura 110 apresentam o comportamento das pressões extremas máximas com 99,0% e 99,9% de probabilidade de não-excedência, respectivamente, dos patamares dos degraus ao longo do vertedouro, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos de permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.

Através da análise das pressões extremas máximas com probabilidade de 99,0% e 99,9% de não-excedência dos patamares dos degraus para a aeração natural e induzida, verifica-se que as mesmas crescem ao longo do vertedouro em degraus, porém, no início da calha em degraus, na região compreendida entre 1,00 e 1,35 m, as cargas de pressões extremas máximas apresentam um comportamento distinto para cada configuração de ensaio. Para a aeração natural as cargas de pressões máximas com probabilidade de 99,0% e 99,9% de não-excedência apresentam praticamente estáveis para todas as vazões específicas ensaiadas, com valores em torno de 0,45 e 0,55 m.c.a., respectivamente.

Ainda nesta região, para a aeração induzida por pilares as cargas de pressões máximas crescem de valores em torno de 0,20 a 0,60 m.c.a., para ambas probabilidades de ocorrências e para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm as cargas de pressões máximas decresce de valores em torno de 0,80 a 0,50 m.c.a. Já para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores de 3, 6 e 9 mm, as cargas de pressões máximas apresentam uma maior dispersão, em virtude do lançamento e impacto do escoamento sobre os degraus do vertedouro.

A partir da posição longitudinal em torno de 1,70 m, determinadas vazões específicas e configurações de ensaio apresentaram comportamentos similares, com valores de carga de pressão próximos.

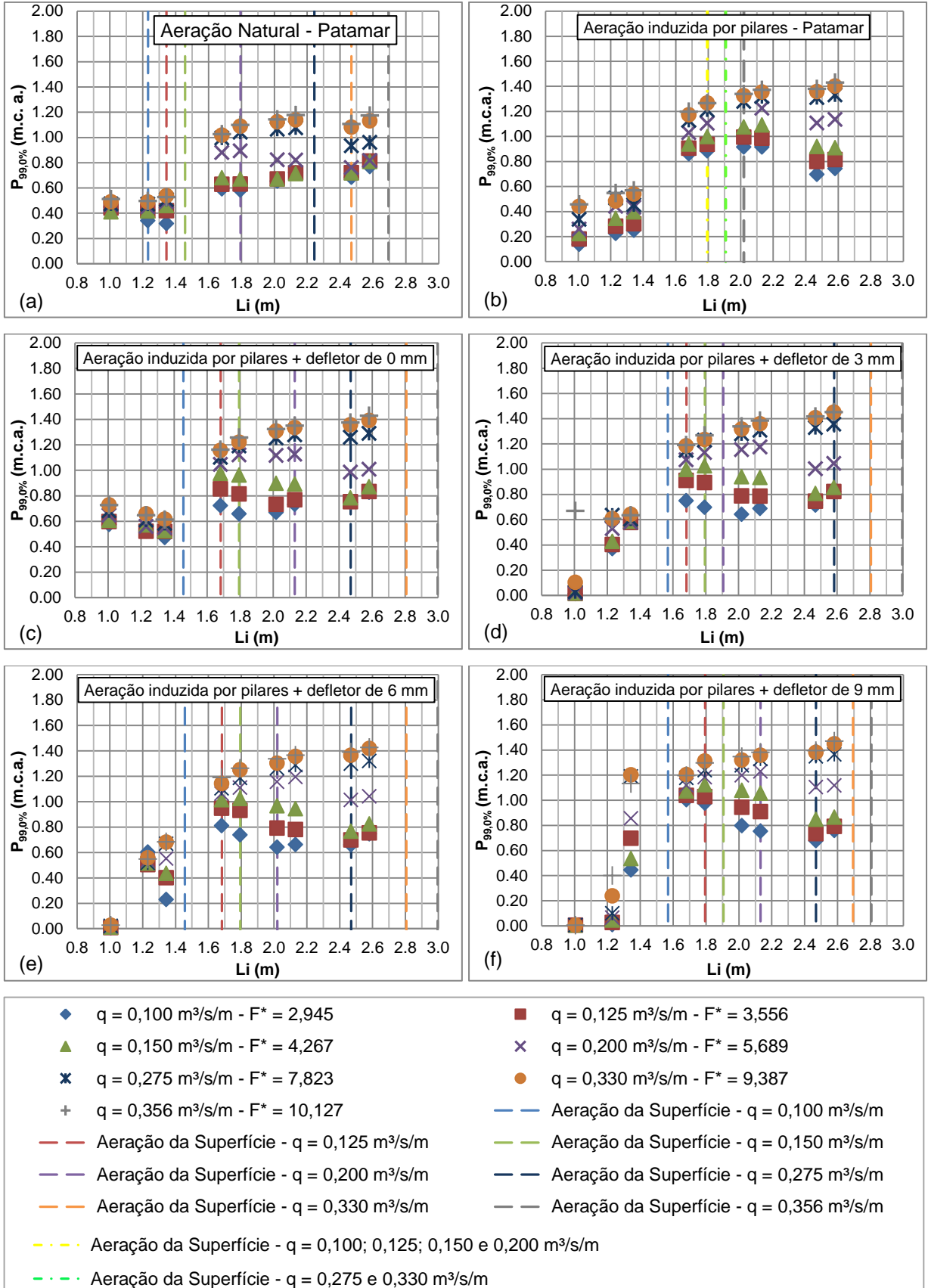


Figura 109 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm



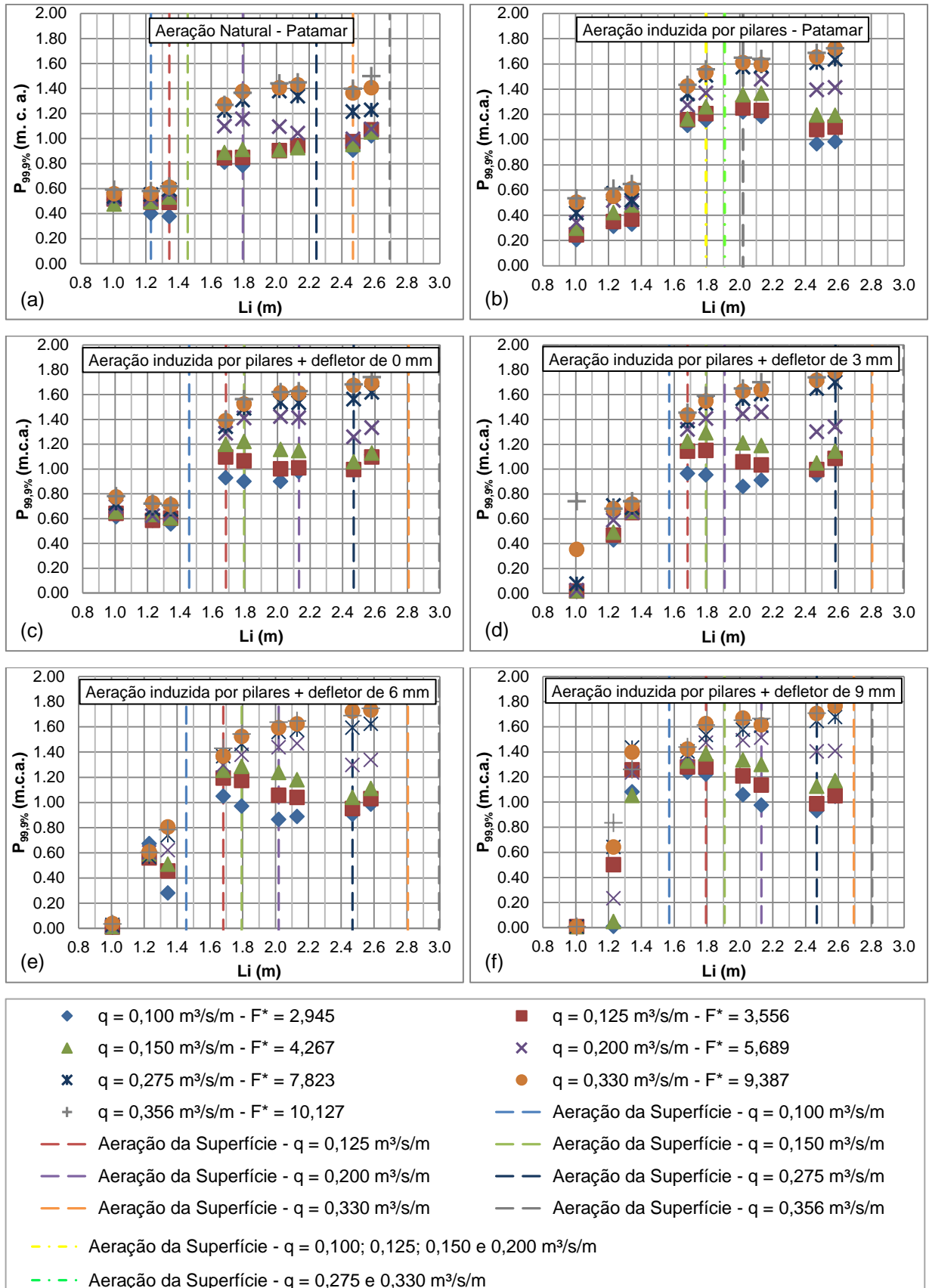


Figura 110 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% para os patamares dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

Para a aeração natural as cargas de pressões extremas máximas, para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, cresceram até o fim da calha em degraus, apresentando valores próximos entre si. Para a vazão específica de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões máximas cresceram até a posição em que ocorre a aeração superficial do escoamento, e, após, os valores decresceram até valores próximos das cargas de pressões máximas das menores vazões específicas, com isso, pode-se inferir que a partir da posição longitudinal de 2,40 m o escoamento está estabilizado para essas vazões específicas.

Para as vazões específicas compreendidas entre 0,275 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a carga de pressão extrema cresceu suavemente até a posição de 2,0 m. E, para a vazão específica de 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, após a posição longitudinal de 2,0 m, posição em que ocorre o início de aeração, a carga de pressão máxima decresce. Já para as vazões específicas de 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões máximas se mantiveram estáveis após a posição longitudinal de 2,0 m, pois a aeração superficial ocorreu no fim da calha em degraus.

Para a aeração por pilares, as cargas de pressões máximas, para todas as vazões ensaiadas, cresceram até a posição longitudinal de 2,0 m. E, após a posição longitudinal de 2,0 m, para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões máximas decresceram até o fim da calha em degraus, sendo que as vazões específicas entre 0,100 e 0,150 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões extremas máximas apresentaram pouca variação. E para as vazões específicas entre 0,275 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões máximas se mantiveram praticamente constantes, em virtude da posição de início de aeração ocorrer mais a jusante, quando comparado com as menores vazões específicas ensaiadas.

Para as configurações de aeração induzida por pilares e defletores, na região compreendida entre a posição longitudinal de 1,70 a 2,60 m, a vazão específica de 0,100 m<sup>3</sup>/s/m apresenta valores praticamente estáveis ao longo da região, pois a aeração da superfície ocorre a montante desta região e, com isso, o escoamento já está estabilizado. Porém, para a aeração induzida por pilares + defletor 9 mm, as cargas de pressões máximas decresceram para a vazão de 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, onde na região entre 1,70 e 1,80 m os valores foram em torno de 0,20 m.c.a. superiores aos valores das outras configurações de aeração induzida por pilares e defletores, podendo estar relacionado com a energia do impacto do jato.

As vazões específicas entre 0,125 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m decrescem até a posição em torno de 2,45 m, onde tendem a se estabilizar até o fim da calha em degraus. E as maiores vazões específicas ensaiadas apresentaram as maiores cargas de pressões extremas máximas, onde as mesmas crescerem até o fim da calha em degraus, atingindo os maiores valores de carga de pressão máxima.

Na Figura 111 e na Figura 112 está apresentado, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, o comportamento das pressões extremas máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9%, respectivamente, dos patamares dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações ensaiadas de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 7.

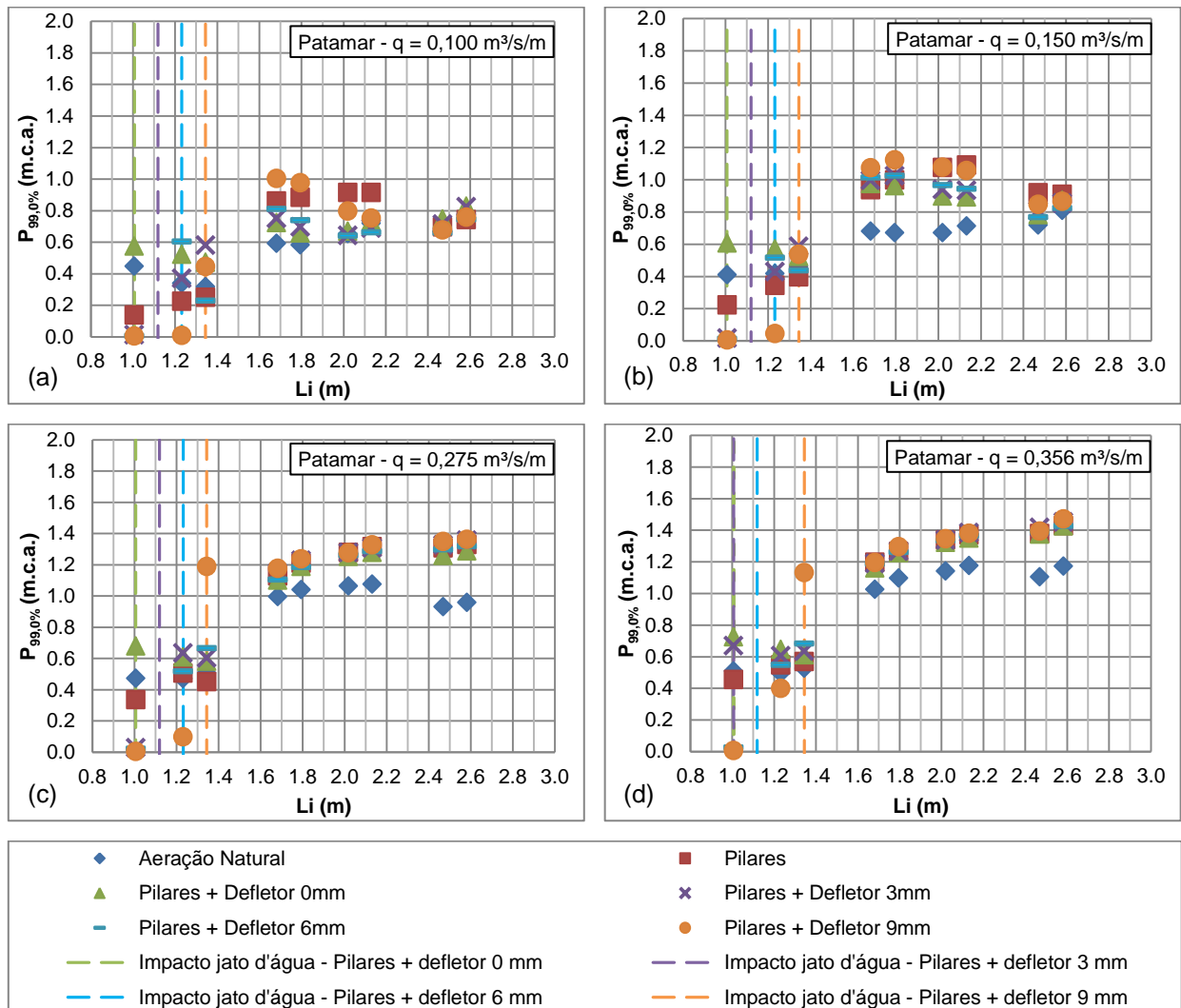


Figura 111 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, (c) vazão específica 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e (d) vazão específica 0,356 m<sup>3</sup>/s/m

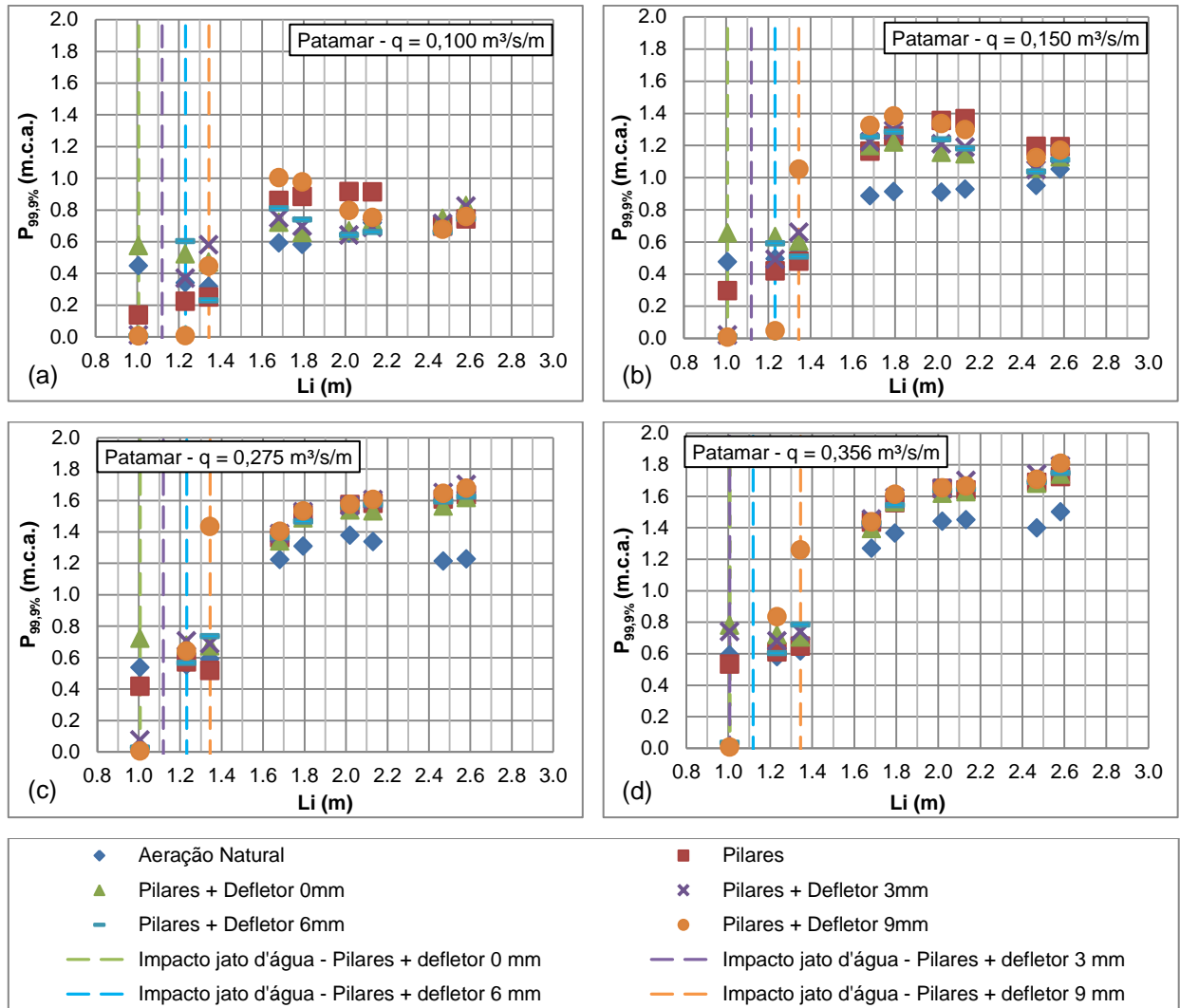


Figura 112 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, (c) vazão específica 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e (d) vazão específica 0,356 m<sup>3</sup>/s/m

A partir da análise do comportamento das pressões máximas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9% dos patamares ao longo do vertedouro para aeração natural e aeração induzida, verifica-se que até a posição de 1,35 m, os valores de carga de pressão apresentam-se dispersos, em virtude do lançamento do escoamento sobre os degraus do vertedouro, onde a carga de pressão extrema máxima se aproxima de 0 m.c.a. e, também, do impacto do jato d'água que causa uma pressão elevada no patamar do degrau, para as configurações com aeração induzida por pilares + defletores de 6 e 9 mm.

Na região compreendida entre as posições longitudinais de 1,60 a 2,60 m, as diferentes configurações de aeração induzida apresentaram comportamento similar, inclusive com valores de carga de pressão muito próximos entre si. Esse

comportamento também é similar ao comportamento da aeração natural, onde a carga de pressão extrema máxima cresce ao longo da calha em degraus, cerca de 0,20 m.c.a.. No entanto, para as vazões específicas 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, a partir da posição de início da aeração superficial do escoamento, a carga de pressão máxima para a aeração induzida decresce e atinge valores próximos da aeração natural. Sendo que essa posição varia com o tipo de configuração de aeração induzida e aumenta conforme aumenta a vazão específica ensaiada.

Para as vazões específicas entre 0,200 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões máximas foram superiores ao longo de toda a calha em degraus em média 0,20 m.c.a., porém em alguns patamares essa diferença foi de até 0,40 m.c.a..

#### **4.2.7.4 Comportamento das pressões extremas máximas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

As pressões extremas máximas com 99,0% e 99,9% dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro estão apresentadas, respectivamente, em função da configuração de ensaio (Figura 113 e Figura 114) e da vazão ensaiada (Figura 115 e Figura 116), pela posição longitudinal ao longo da calha do vertedouro em degraus, ou seja, considerando as distâncias acumuladas a partir da crista da ogiva do vertedouro.

A Figura 113 e a Figura 114 apresentam o comportamento das pressões extremas máximas com 99,0% e 99,9% de probabilidade de não-excedência, respectivamente, dos espelhos dos degraus ao longo do vertedouro, para a aeração natural, ou seja, sem implantação de dispositivos que permitem a incorporação de ar no escoamento, para a aeração induzida por pilares, com a implantação dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau e para a aeração induzida por pilares + defletores, onde foram implantados, além dos pilares nas laterais do vertedouro até o primeiro degrau, defletores com espessuras de 0, 3, 6 e 9 mm.

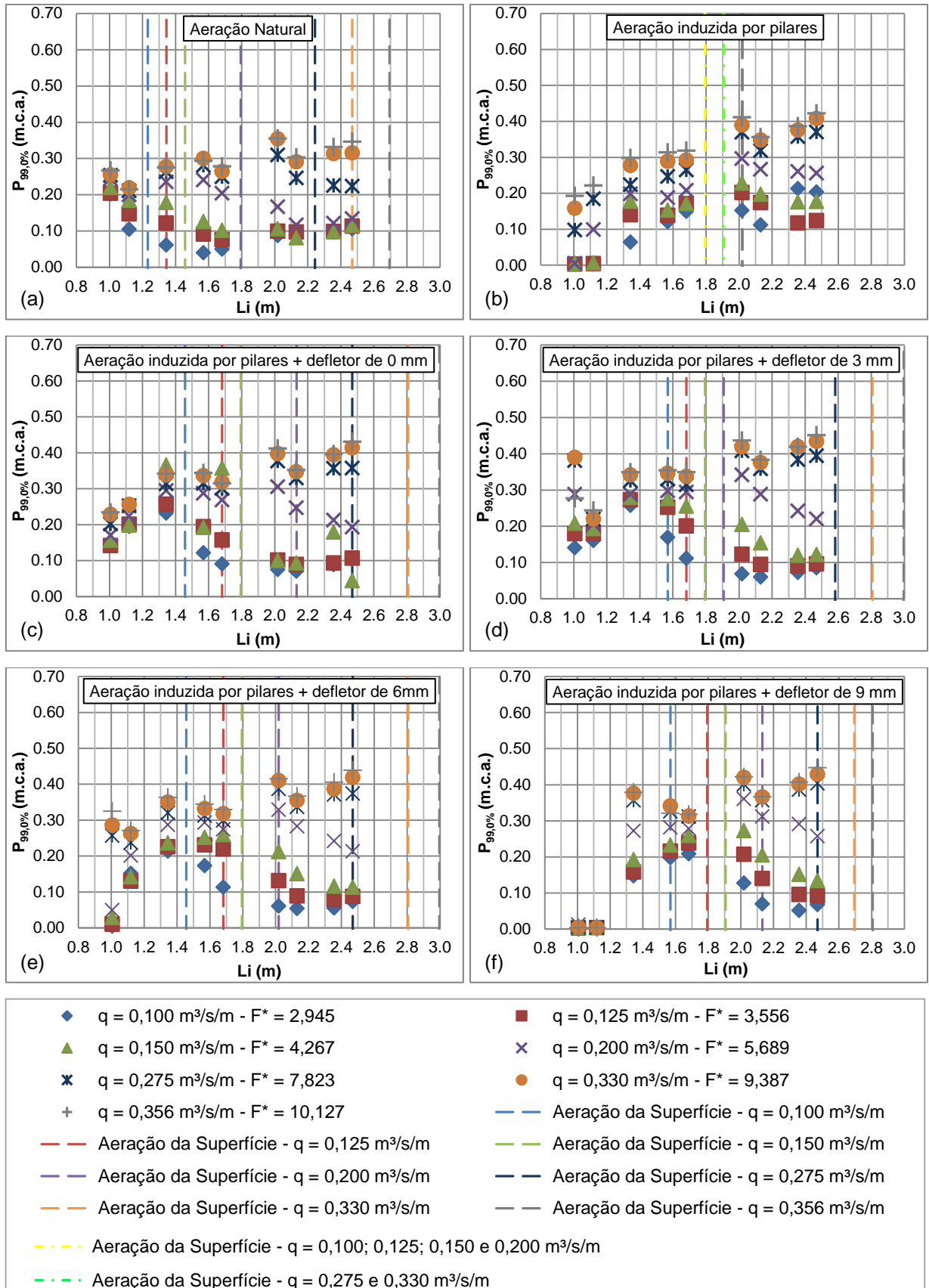


Figura 113 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

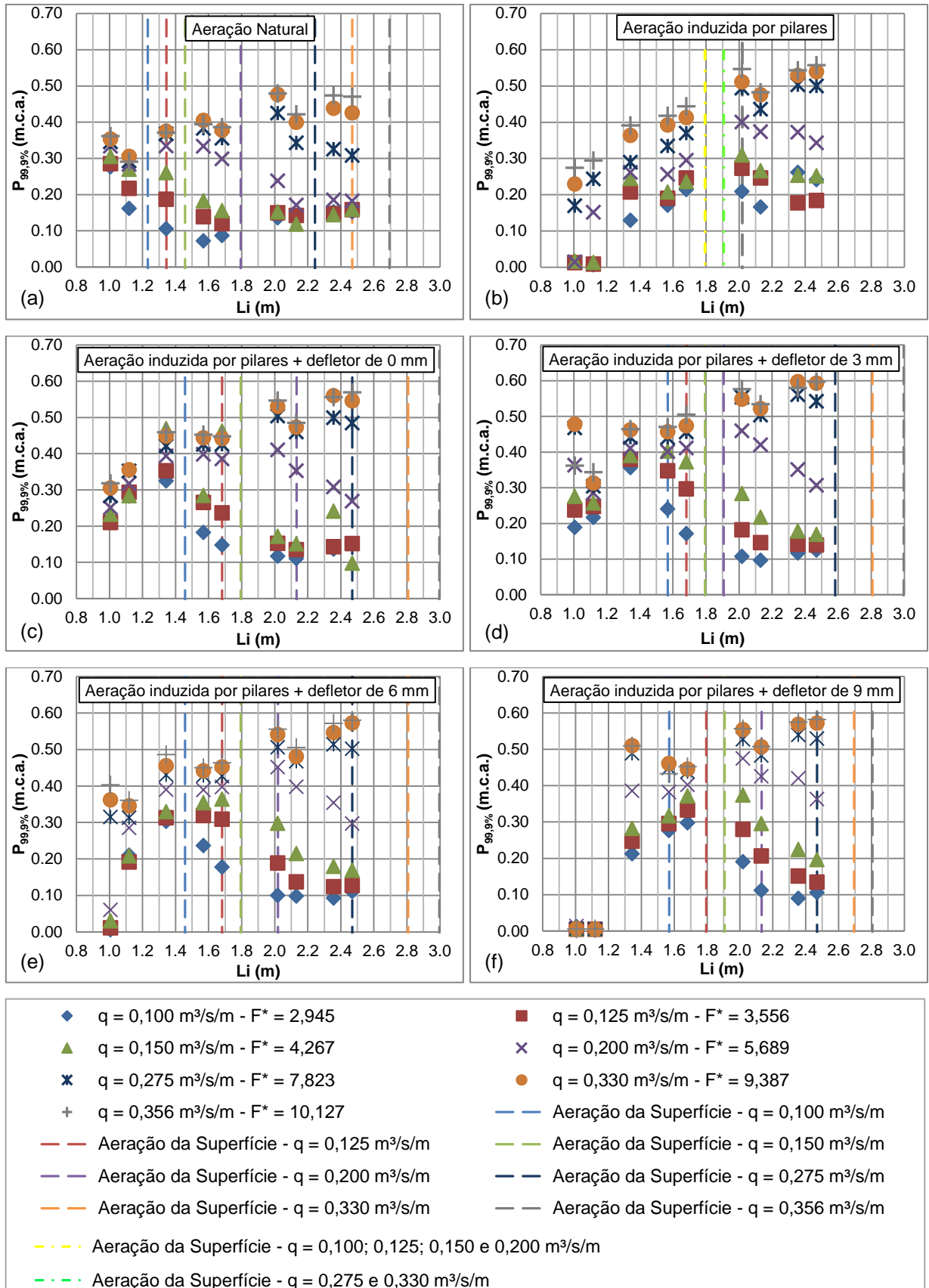


Figura 114 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% para os espelhos dos degraus para (a) aeração natural, aeração induzida por (b) pilares, (c) pilares + defletor de 0 mm, (d) pilares + defletor de 3 mm, (e) pilares + defletor de 6 mm e (f) pilares + defletor de 9 mm

A partir da análise do comportamento das pressões extremas máximas com probabilidade de 99,0% e 99,9% de não-excedência, verificadas no espelho dos degraus do vertedouro, para a aeração natural, percebe-se que para as vazões específicas menores, entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões máximas, no início da calha em degraus, atingiram os valores máximos e, posteriormente, a partir da posição de início de aeração, as cargas de pressões extremas máximas decrescem até estabilizar com valores próximos entre si, indicando que o escoamento está totalmente desenvolvido.

Para a vazão de 0,200 m<sup>3</sup>/s/m a carga de pressão máxima manteve-se praticamente estável até a posição longitudinal em torno de 1,55 m, e, posteriormente, decresceu a partir da posição de início de aeração e estabilizou no fim da calha em degraus com valores próximos ao das vazões específicas inferiores.

Já nas vazões específicas entre 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, as cargas de pressões máximas crescem, sendo que a vazão específica de 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, a partir da posição em torno de 2,00 m, quando ocorreu a aeração superficial do escoamento, as cargas de pressões máximas decresceram até o fim da calha em degraus. E para as vazões específicas de 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a carga de pressão máxima manteve-se praticamente constante a partir da posição de 2,0 m, pois a posição de início de aeração ocorreu no fim da calha em degraus.

Para a aeração induzida por pilares percebe-se que as cargas de pressões máximas para vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, crescem até a posição longitudinal de 2,00 m, posição na qual atingiram seus valores máximos e próximos a posição de início de aeração. Posteriormente, os valores decresceram até o fim da calha em degraus.

Como para as vazões específicas superiores, entre 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a posição de início de aeração ocorreu no fim da calha em degraus, as cargas extremas máximas crescem, também, até o fim da calha em degraus e possuem valores próximos entre si.

O comportamento das cargas de pressões máximas para as diferentes configurações de aeração induzida por pilares e defletores é similar. No entanto, na região compreendida entre as posições longitudinais entre 1,00 a 1,35 m, ocorre a maior diferença, em virtude do lançamento do escoamento quando em contato com o defletor, que faz com que a carga de pressão máxima seja em torno de 0 m.c.a., e,



na posição em que o escoamento impacta o degrau, ocorre o crescimento das cargas de pressões máximas.

E, a partir dessa posição, o comportamento é similar para as diferentes configurações de aeração induzida por pilares e defletor, inclusive os valores de cargas de pressões extremas são muito próximos.

Para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões máximas decrescem, a partir da região em que ocorre a aeração superficial do escoamento. E para as vazões entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões máximas são próximas entre si e estabilizam no fim da calha em degraus, indicando que o escoamento está estabilizado.

Já para as vazões específicas entre 0,275 a 0,356 m<sup>3</sup>/s/m as cargas de pressões máximas crescem até o fim da calha em degraus, visto que, a posição de início de aeração também ocorre no fim da calha.

Na Figura 115 e Figura 116 estão apresentados, para as vazões específicas de 0,100; 0,150; 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, o comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% e 99,9%, respectivamente, dos espelhos dos degraus do vertedouro para a aeração natural e para as diferentes configurações ensaiadas de aeração induzida. As vazões específicas de 0,125; 0,200 e 0,330 m<sup>3</sup>/s/m encontram-se no Apêndice 8.

A partir da análise do comportamento das pressões máximas associada à probabilidade de não-excedência de 99,0% e 99,9% dos espelhos ao longo do vertedouro para aeração natural verifica-se que as cargas de pressão até a região da aeração da superfície do escoamento tendem a crescer e posteriormente decrescem, onde para as vazões específicas menores a carga de pressão extrema máxima tendeu a se estabilizar.

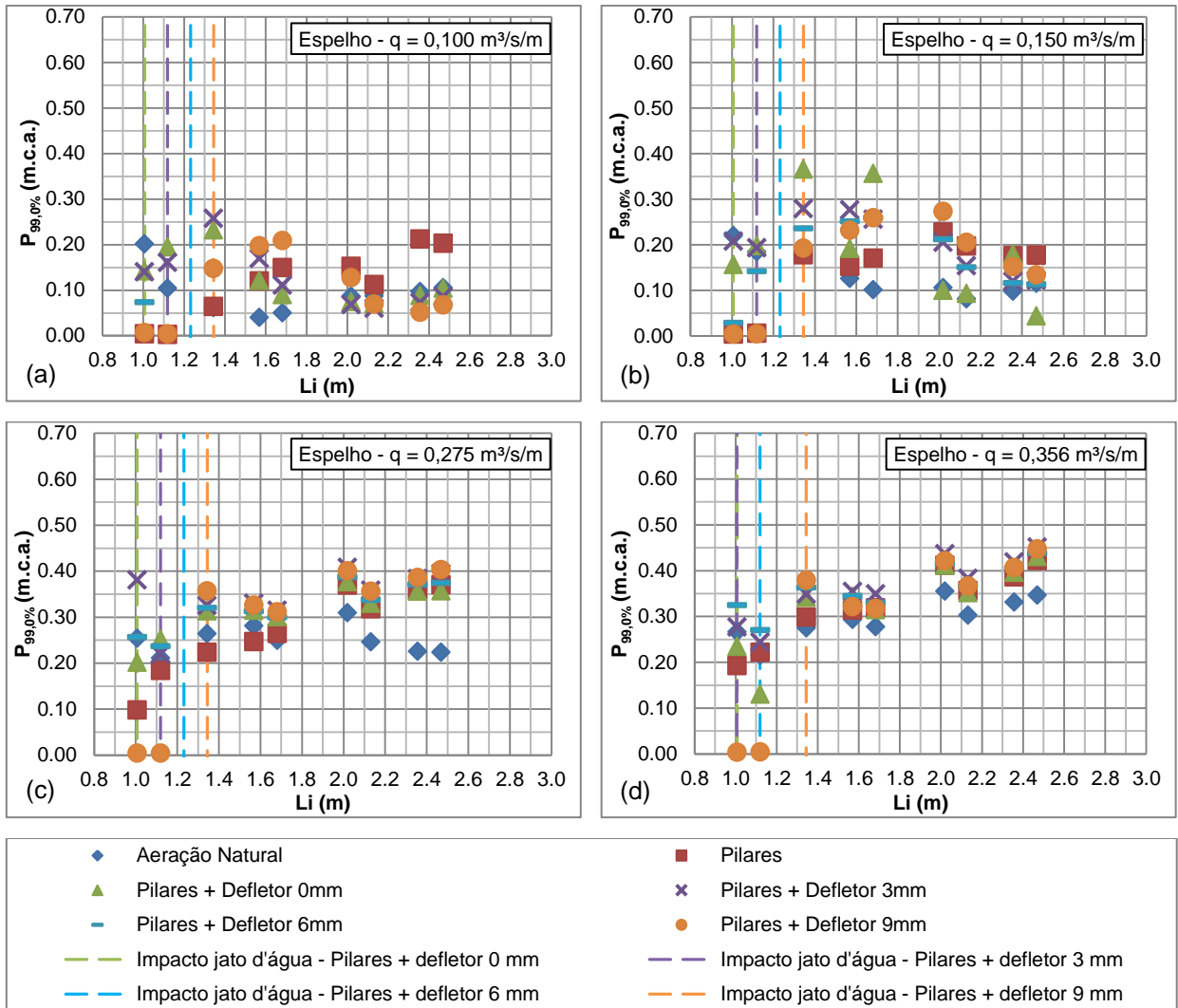


Figura 115 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,100 m³/s/m, (b) vazão específica 0,150 m³/s/m, (c) vazão específica 0,275 m³/s/m e (d) vazão específica 0,356 m³/s/m

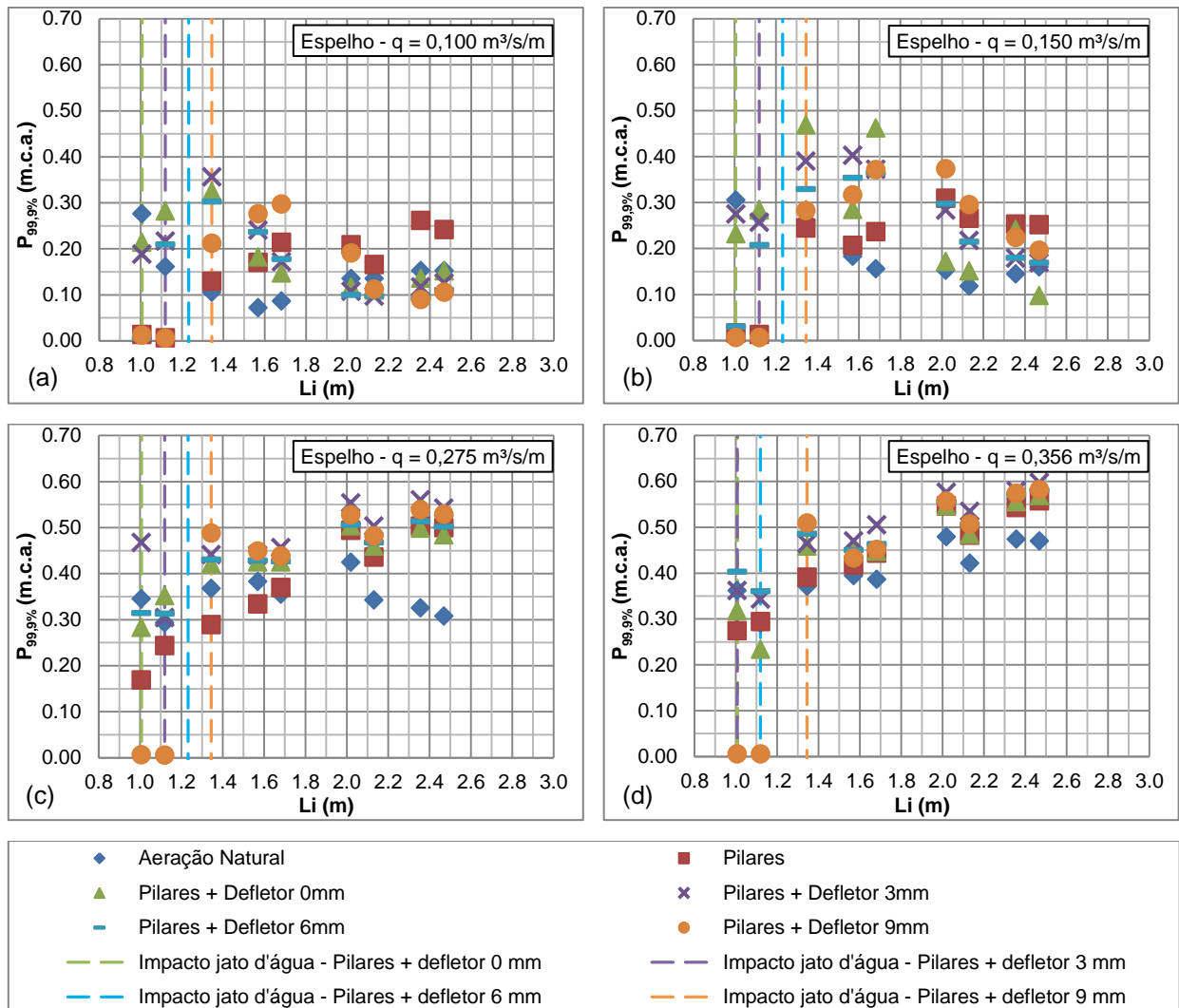


Figura 116 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,100 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,150 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (c) vazão específica  $0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (d) vazão específica  $0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

Para a aeração induzida, as pressões máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,0% e 99,9% dos espelhos, até a posição de 1,10 m, apresentaram valores mais dispersos, sendo que a maioria dos valores de carga de pressão extrema máxima foram superiores à aeração natural, com exceção das posições sem presença de escoamento, onde ocorreu o lançamento do jato d'água sobre os degraus e para as maiores vazões da aeração induzida por pilares.

Para a aeração induzida por pilares, os valores de carga de pressão máxima foram próximos da aeração natural para as menores vazões e, inferiores à aeração natural para as maiores vazões, até a posição longitudinal em torno de 1,60 m. E a partir dessa posição os valores foram cerca de 0,10 m.c.a. superiores.

Para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, no fim da calha em degraus, a partir da aeração superficial total do escoamento, os valores de carga de pressão extrema da aeração induzida tendem a se aproximar da aeração natural. E para as vazões específicas entre 0,275 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m e aeração induzida, a carga de pressão extrema máxima cresce até o fim da calha em degraus, pois a aeração total do escoamento não ocorre, em virtude da altura do modelo físico do vertedouro. Os valores são superiores aos valores de carga de pressão máxima da aeração natural do escoamento, chegando a valores máximos de 0,45 e 0,60 m.c.a., para as pressões associadas à probabilidade de não-excedência de 99,0% e 99,9%, respectivamente.

#### **4.2.8 Comportamento das menores pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% dos patamares e espelhos dos degraus**

Na Figura 117 (a) e (b) está apresentado o comportamento dos menores valores de pressão extrema mínima com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) e na Figura 118 (a) e (b) as posições em que ocorrem os menores valores de pressões dos patamares, comparando a aeração natural com a aeração induzida por pilares (Figura 117 e Figura 118 (a)) e a aeração natural com as diferentes configurações de aeração induzida por pilares + defletor (Figura 117 Figura 118 (b)).

Na Figura 117 e na Figura 118 não estão representadas os valores das menores  $P_{0,1\%}$ , para as maiores vazões específicas, pois, a partir da análise dos menores valores de pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1%, percebeu-se que para as configurações de aeração natural e aeração induzida por pilares e vazão específica de 0,356 m<sup>3</sup>/s/m e para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores e vazões específicas de 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a aeração do escoamento ocorreu à jusante dos patamares instrumentados, desta forma, a menor carga de pressão não foi medida.

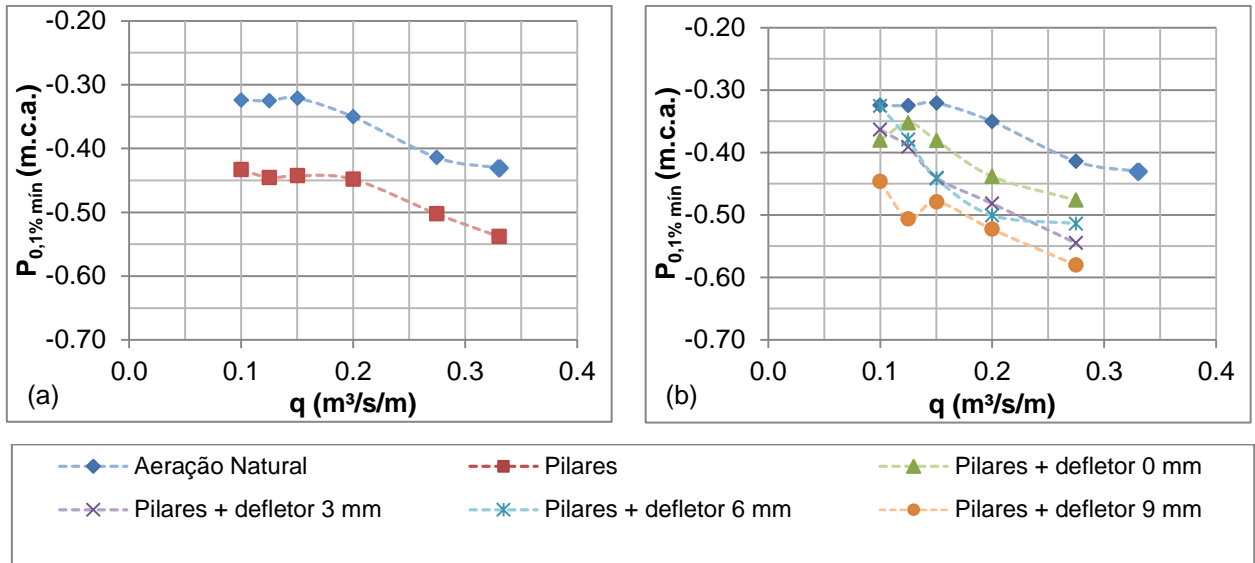


Figura 117 - Comportamento das pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos patamares

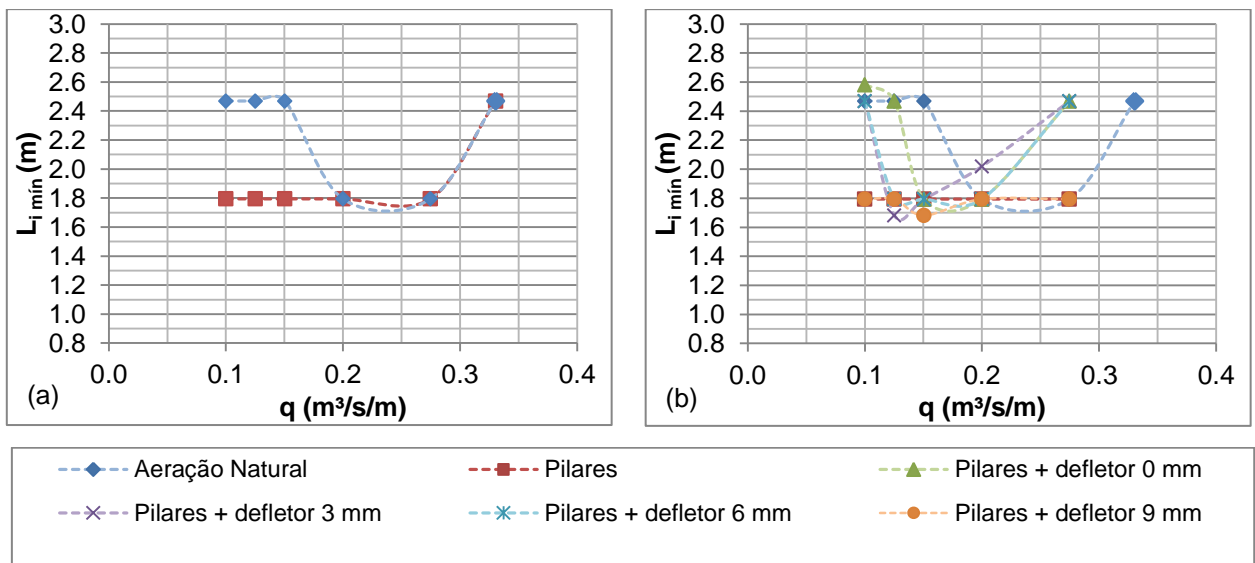


Figura 118 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos patamares

Os menores valores de pressão extrema com probabilidade de não-excedência de 0,1% para a aeração natural e aeração induzida por pilares apresentam comportamento similar, no entanto, a aeração induzida por pilares apresentou valores de carga de pressão inferiores à aeração natural, em média de 0,10 m.c.a., conforme Figura 117 (a). As configurações com aeração induzida por pilares + defletores também apresentaram valores de carga de pressão inferiores à aeração natural e, de maneira geral, as menores cargas de  $P_{0,1\%}$  decresceram com o

aumento da vazão específica e, conforme aumenta a espessura do defletor os menores valores de carga de  $P_{0,1\%}$  foram inferiores, com exceção da aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, que variou com o aumento da vazão específica (Figura 118 (b)).

Para a aeração natural os menores valores de  $P_{0,1\%}$ , mantiveram-se, praticamente, estáveis para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m e, além disso, as menores  $P_{0,1\%}$ , ocorreram no fim da calha em degraus, na posição em torno de 2,50 m (Figura 118 (b)). Isso ocorre, pois as cargas de pressões ao longo da calha também se mantiveram, praticamente, estáveis após a posição de início de aeração, sendo que a maior diferença entre cargas de pressões nesta região é em torno de 0,07 m.c.a.. Para as maiores vazões específicas, os menores valores de  $P_{0,1\%}$  decresceram conforme a vazão específica aumenta (Figura 118 (a)). E a menor  $P_{0,1\%}$ , para as vazões específicas de 0,200 a 0,330 m<sup>3</sup>/s/m, ocorreu próxima a região em que o escoamento aerou, em torno da posição longitudinal de 1,80 m, para as vazões específicas de 0,200 e 0,275 m<sup>3</sup>/s/m e, em torno de 2,50 m, para a vazão específica de 0,330 m<sup>3</sup>/s/m.

Assim como a aeração natural, para a aeração induzida por pilares os menores valores de  $P_{0,1\%}$  também mantiveram-se praticamente constante para as menores vazões, no entanto, para esta configuração, isso ocorreu para as vazões específicas entre 0,100 a 0,200 m<sup>3</sup>/s/m (Figura 117 (a)) e posição longitudinal em que ocorreu o menor valor de  $P_{0,1\%}$  foi na região próxima a aeração superficial parcial, em torno de 1,80 m (Figura 118 (a)). Para as maiores vazões específicas os menores valores de  $P_{0,1\%}$  decresceram e a posição longitudinal em que ocorreu a menor  $P_{0,1\%}$  se deslocou para jusante, em torno de 2,50 m, devido à posição de início de aeração superficial parcial também acontecer mais a jusante. Com exceção da vazão específica de 0,275 m<sup>3</sup>/s/m, que a menor carga de  $P_{0,1\%}$ , ocorreu na posição de 1,80 m, no entanto, tanto da posição de 1,80 m, quanto na posição de 2,50 m ocorreram baixos valores de carga de  $P_{0,1\%}$ .

A partir da Figura 117 (b), percebe-se que conforme a vazão específica aumenta, a menor carga de  $P_{0,1\%}$  decresce, e para as configurações de aeração induzida são sempre inferiores, para uma mesma vazão específica, quando comparado com as menores  $P_{0,1\%}$  da aeração natural. A posição em que ocorre a menor carga de  $P_{0,1\%}$ , conforme Figura 118 (b), se desloca para jusante com o aumento da vazão específica, com exceção da aeração induzida por pilares +

defletor de 0 mm, para as vazões específicas de 0,100 e 0,125 m<sup>3</sup>/s/m, e para a aeração induzida por pilares + defletor de 3 e 6 mm, para a vazão específica de 0,100 m<sup>3</sup>/s/m, em que a menor carga de  $P_{0,1\%}$  foi na região entre 2,50 a 2,60 m, porém como a aeração superficial parcial do escoamento ocorreu no início da calha em degraus as cargas de pressões com probabilidade de não-excedência de 0,1% mantiveram-se praticamente constantes ao longo da calha.

Na Figura 119 (a) e (b) estão apresentados o comportamento dos menores valores de pressão extrema mínima com probabilidade de não-excedência de 0,1% e na Figura 120 (a) e (b) as posições em que ocorrem os menores valores de pressões dos espelhos comparando a aeração natural com a aeração induzida por pilares (Figura 119 e Figura 120 (a)) e a aeração natural com as diferentes configurações de aeração induzida por pilares + defletor (Figura 119 e Figura 120 (b)).

Na Figura 119 e na Figura 120 não estão representadas os valores das menores  $P_{0,1\%}$ , para as maiores vazões específicas, pois, a partir da análise dos menores valores de pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1%, percebeu-se que para as configurações de aeração natural e aeração induzida por pilares e vazão específica de 0,356 m<sup>3</sup>/s/m e para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores e vazões específicas de 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, a aeração do escoamento ocorreu à jusante dos patamares instrumentados, desta forma, a menor carga de pressão não foi medida.

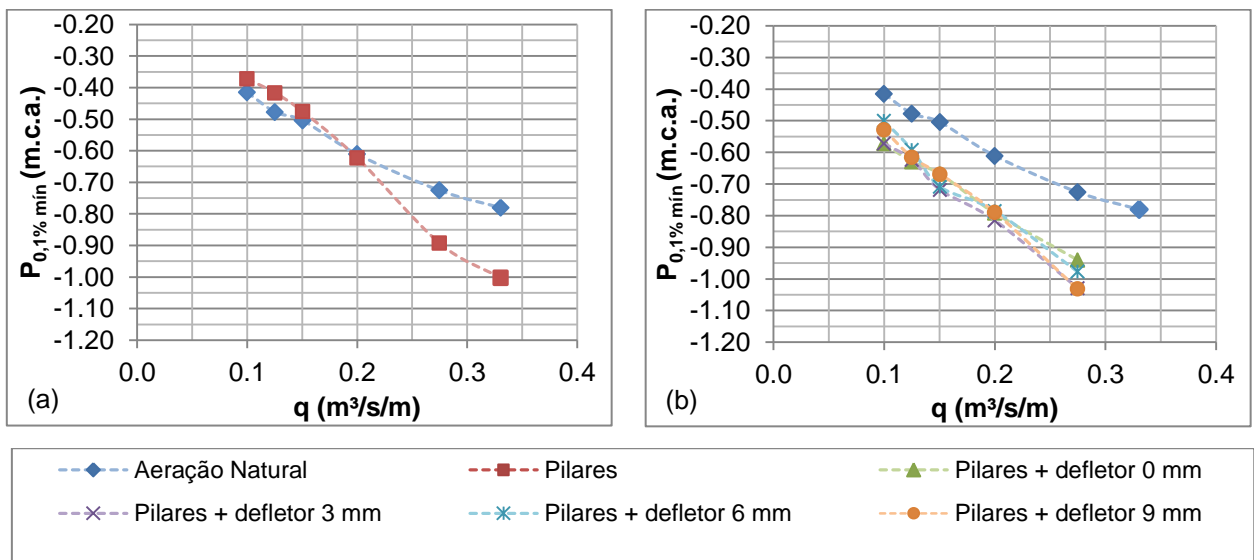


Figura 119 - Comportamento das pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos espelhos

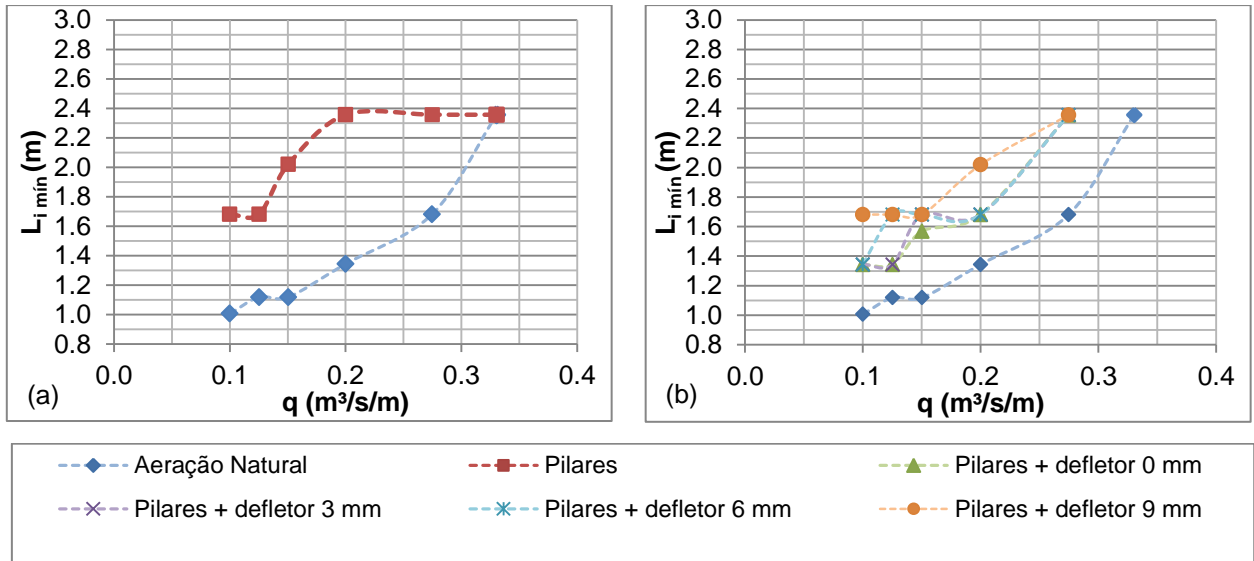


Figura 120 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos espelhos

A partir da Figura 119 (a) e (b) percebe-se que o comportamento dos menores valores de carga de  $P_{0,1\%}$  é similar para todas as configurações de ensaio, onde os mesmos decrescem conforme a vazão específica aumenta.

A aeração induzida por pilares apresentou, para as vazões específicas entre 0,100 e 0,150  $m^3/s/m$ , os menores valores de  $P_{0,1\%}$  superiores aos menores valores de  $P_{0,1\%}$  da aeração natural (Figura 119 (a)) e, para as maiores vazões específicas as menores  $P_{0,1\%}$  foram inferiores. Já para a aeração induzida por pilares + defletores os menores valores  $P_{0,1\%}$  apresentaram valores próximos entre si e inferiores a aeração natural para todas as vazões específicas (Figura 119 (b)).

Em relação à posição longitudinal em que ocorre o menor valor de  $P_{0,1\%}$ , percebe-se a partir da Figura 120 (a) e (b), que conforme aumenta a vazão específica, a posição desloca-se para jusante, estando relacionada com a aeração do escoamento, ou seja, a menor  $P_{0,1\%}$  ocorre próximo a posição de início de aeração.

A partir da comparação entre os menores valores de pressões extremas mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% dos patamares (Figura 117) e dos espelhos (Figura 119), percebe-se que nos espelhos ocorrem valores de  $P_{0,1\%}$  inferiores, ou seja, a situação é mais crítica nos espelhos.



Na Figura 121 (a) a (f) pode-se visualizar a comparação do comportamento das posições longitudinais em que ocorrem as menores cargas de  $P_{0,1\%}$  para os patamares e espelhos dos degraus.

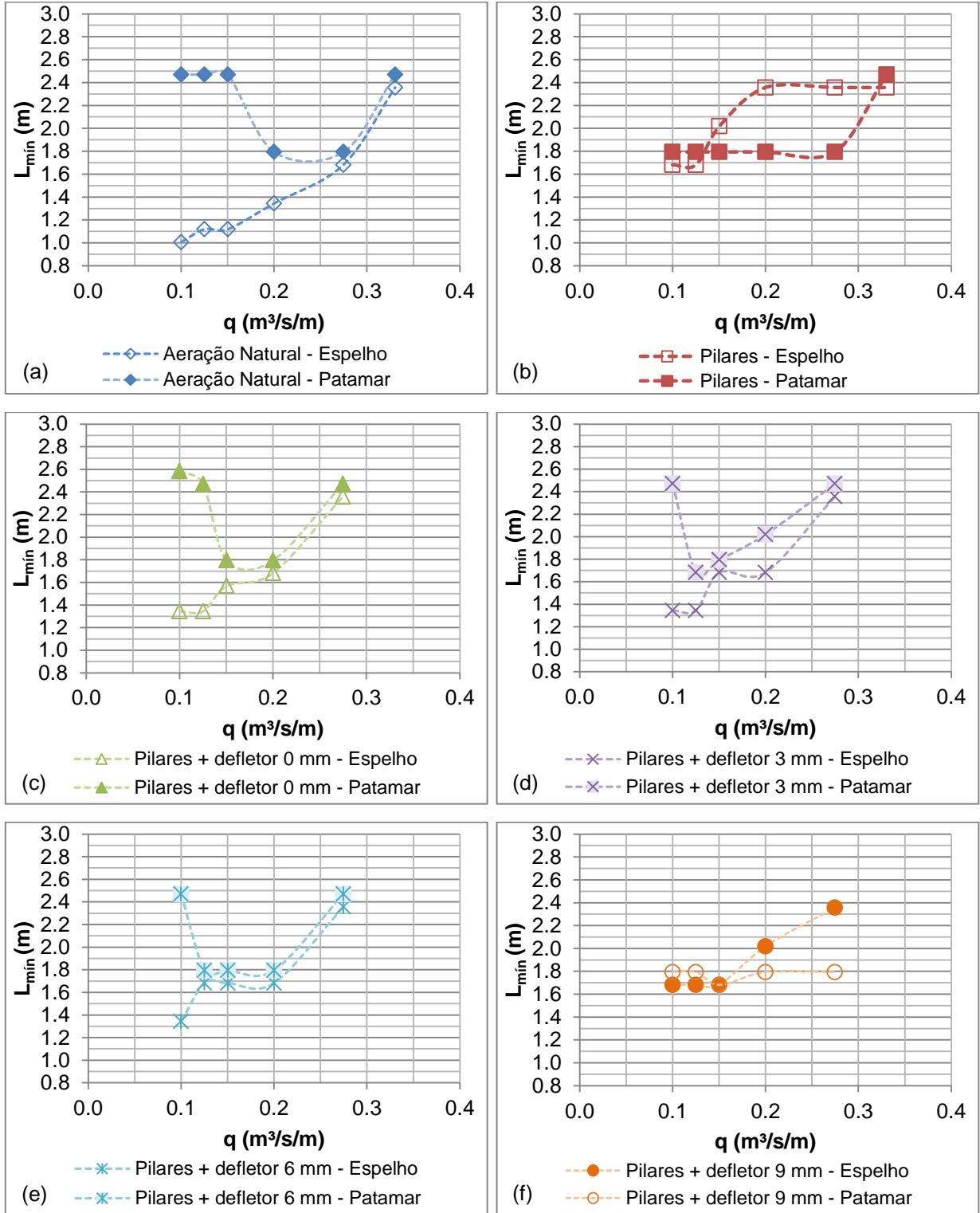


Figura 121 - Comparação entre a posição longitudinal em que ocorre a menor pressão mínima nos espelhos e patamares

A partir da comparação dos menores valores de  $P_{0,1\%}$  entre patamares e espelhos percebe-se que, de maneira geral, para as maiores vazões específicas ocorrem na mesma região.

Para a aeração natural somente as vazões específicas de 0,275 e 0,330  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  que as menores cargas de  $P_{0,1\%}$  ocorrem na mesma região, pois para as vazões específicas entre 0,100 e 0,150  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  a menor carga de  $P_{0,1\%}$  ocorre no fim da calha em degraus para o patamar e, no início da calha para o espelho, já para a vazão específica de 0,200  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  essa diferença diminuiu, estando distante em torno de 0,45 m.

Para a aeração induzida por pilares + defletor de 0, 3 e 6 mm o comportamento foi similar à aeração natural, em que para as maiores vazões específicas, os menores valores de  $P_{0,1\%}$  ocorreram na mesma região. As vazões específicas em que os menores valores de  $P_{0,1\%}$  não ocorreram na mesma região para o patamar e o espelho foram: 0,100 e 0,125  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm, 0,100  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  para a aeração induzida por pilares + defletor de 3 e 6 mm.

O comportamento da aeração induzida por pilares e pilares + defletor de 9 mm foram similares, pois apenas para as vazões específicas intermediárias, 0,150 a 0,275  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para a aeração induzida por pilares e 0,200 e 0,275  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para a aeração induzida por pilares + defletor de 9 mm, os menores valores de  $P_{0,1\%}$  ocorreram em regiões distantes.

Na Figura 122 (a) e (b) apresenta o comportamento dos menores valores de pressão mínima com probabilidade de 0,1% de ocorrência para o patamar e o espelho, respectivamente, adimensionalizadas pela profundidade do escoamento no primeiro degrau ( $h_0$ ) e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso do degrau ( $F^*$ ). Para cada conjunto de dados, patamares e espelhos, ajustou-se uma curva, também representada na Figura 122 (a) e (b), e, gerou-se uma equação, considerando todas as configurações de aeração induzida, já que os dados não apresentam dispersão entre si.

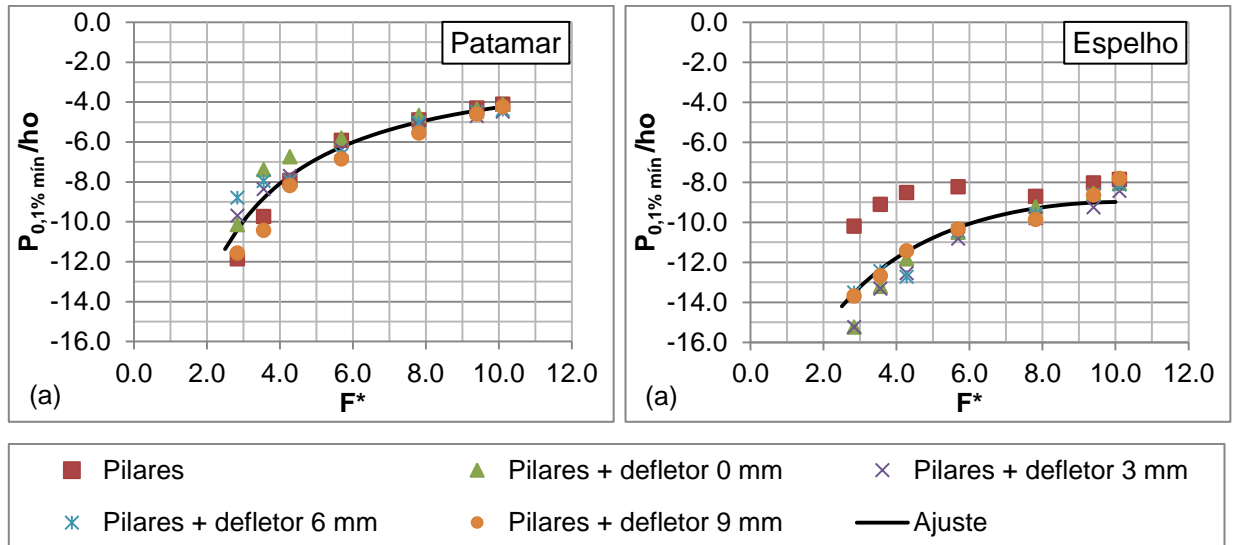


Figura 122 – Comportamento dos adimensionais dos menores valores de pressão mínima com probabilidade de não-excedência de 0,1% de ocorrência para (a) patamar e (b) espelho

A função que melhor adequou-se para representar os adimensionais dos menores valores de pressão mínima com probabilidade de 0,1% de ocorrência dos patamares e dos espelhos, e o número de Froude rugoso foi a função quadrática recíproca, representada pela Equação 11. Os coeficientes (a, b e c) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais adimensionalizados estão apresentados na Tabela 11.

$$\frac{P_{0,1\% \text{ mín}}}{h_o} = \frac{1}{(a + b \cdot x + c \cdot x^2)} \quad \text{Equação 11}$$

Tabela 9 – Coeficientes a, b e c obtidos para a Equação 11 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos patamares e espelhos

	a	b	c	$R^2$
Patamar	-0,0216	-0,0283	0,0007	0,8610
Espelho	-0,0393	-0,0142	0,0007	0,5746

As equações quadráticas recíprocas ajustadas para as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% apresentam coeficientes de correlação 0,8610 para os patamares e 0,5746 para os espelhos. Sendo que para os espelhos o coeficiente de correlação foi menor, pois os dados da aeração induzida

por pilares apresentaram uma maior dispersão em relação aos outros. No entanto, indica-se que este adimensional permiti uma previsão aproximada do menor valor de  $P_{0,1\%}$  para um determinado protótipo de vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e por pilares + defletores, para números de Froude rugoso entre 2,50 a 10,00.

Na Figura 123 (a) e (b) apresenta o comportamento das posições longitudinais em que ocorreram os menores valores de pressão mínima com probabilidade de 0,1% de ocorrência para os patamares e os espelhos, respectivamente, adimensionalizadas pela profundidade do escoamento no primeiro degrau ( $h_0$ ) e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso do degrau ( $F^*$ ). Para cada conjunto de dados, patamares e espelhos, ajustou-se uma curva, também representada na Figura 123 (a) e (b), e, gerou-se uma equação, considerando todas as configurações de aeração induzida, já que os dados não apresentam dispersão entre si.

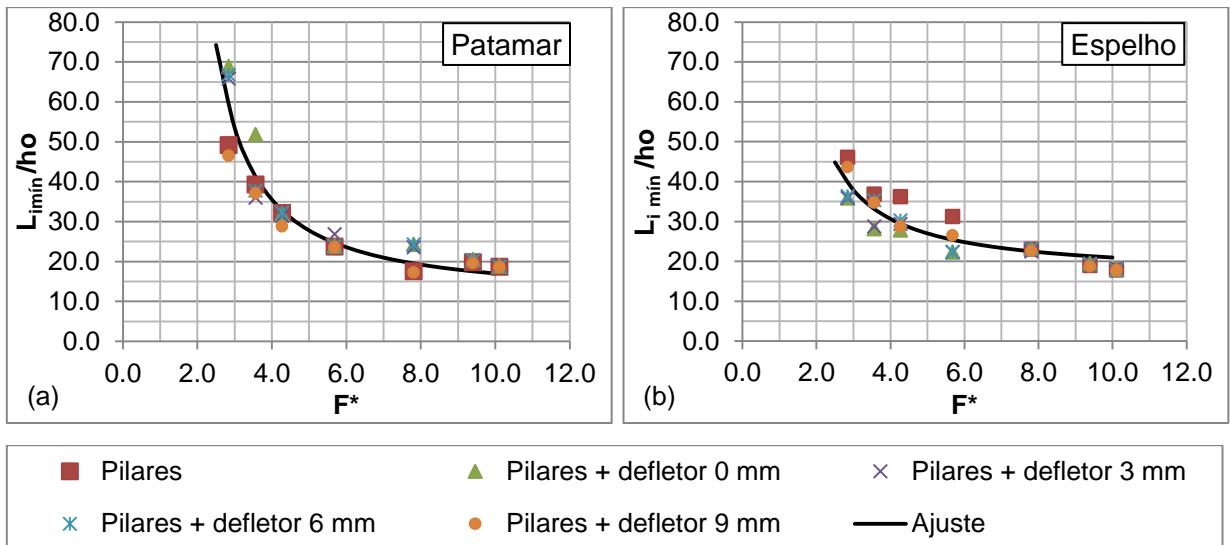


Figura 123 - Comportamento dos adimensionais das posições em que ocorrem as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos espelhos para (a) patamar e (b) espelho

A função que melhor adequou-se para representar os adimensionais das posições longitudinais em que ocorrem os menores valores de pressão mínima com probabilidade de 0,1% de ocorrência dos patamares e dos espelhos, e o número de Froude rugoso foi a função exponencial modificada, representada pela Equação 14. Os coeficientes (a e b) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais adimensionalizados estão apresentados na Tabela 12.

$$\frac{L_{i \min}}{h_o} = a \cdot e^{b/F^*}$$

Equação 12

Tabela 10 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 14 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das posições longitudinais em que ocorrem as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% ( $P_{0,1\%}$ ) dos patamares e espelhos

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Patamar	10,3915	4,9161	0,8684
Espelho	16,2737	2,5329	0,7781

As funções exponenciais modificadas ajustadas para as posições longitudinais em que ocorrem as menores pressões mínimas com probabilidade de não-excedência de 0,1% para os patamares e espelhos apresentam coeficientes de correlação satisfatórios, indicando que este adimensional permiti uma previsão aproximada da posição em que ocorre o maior valor de  $P_{0,1\%}$  para um determinado protótipo de vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e por pilares e defletores.

Para verificar a influência da aeração induzida no comportamento das pressões extremas mínimas, em relação à aeração natural, os menores valores de pressões extremas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e a posição em que os mesmos ocorrem para as diferentes configurações de aeração induzida foram divididos pelos valores em que ocorrem no escoamento com a aeração natural.

Na Figura 124 (a) e (b) estão apresentados, para os patamares, o comportamento da relação entre aeração induzida e a aeração natural da pressão extrema mínima  $P_{0,1\%}$  e da posição em que o mesmo ocorre, respectivamente, e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso.

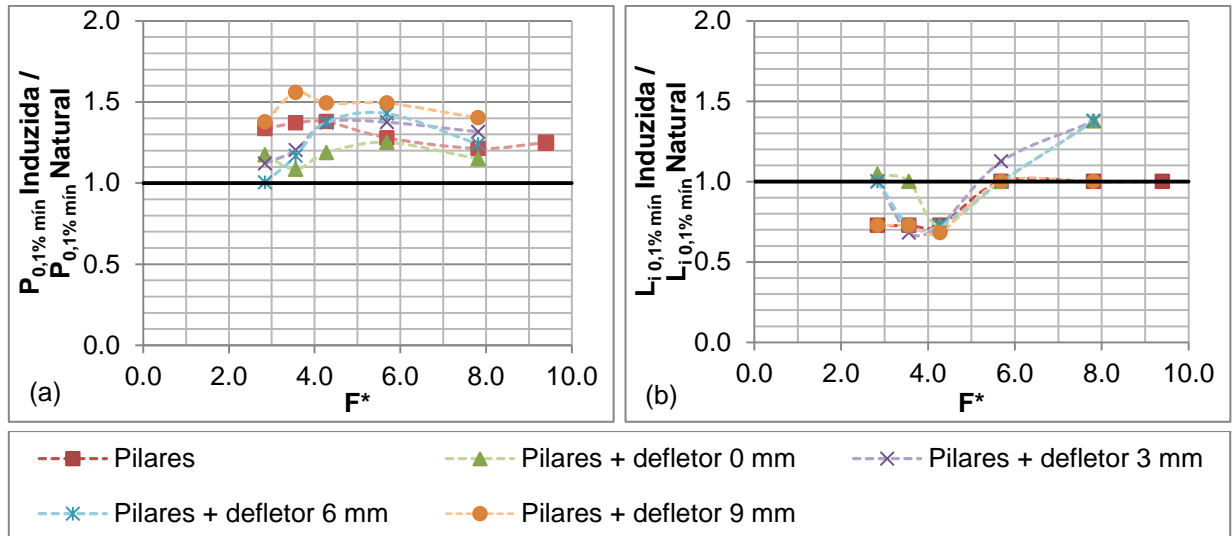


Figura 124 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos patamares

Para os patamares dos degraus do vertedouro a relação das menores pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% apresentou valores superiores a 1,0, conforme pode-se visualizar na Figura 124 (a), para todas as configurações de aeração induzida e números de Froude rugoso, indicando que a implementação de pilares e pilares + defletores na calha do vertedouro em degraus não amortece os valores de pressões extremas mínimas.

Já em relação a relação da posição longitudinal em que ocorre o menor valor de  $P_{0,1\%}$  verifica-se na Figura 124 (b), que para a maioria das condições de ensaio os valores foram inferiores e igual a 1,0, sendo que apenas para o número de Froude rugoso superior a 5,6 e aeração induzida por pilares + defletores de 0, 3 e 6 mm, os valores foram superiores a 1,0, indicando que o menor valor de pressão extrema mínima associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1%, para a aeração induzida ocorre mais a jusante ou na mesma posição longitudinal quando comparado a aeração natural, na maioria das condições de ensaio.

Na Figura 125 (a) e (b) estão apresentados, para os espelhos, o comportamento da relação entre aeração induzida e a aeração natural da pressão extrema mínima  $P_{0,1\%}$  e da posição em que o mesmo ocorre, respectivamente, e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso.

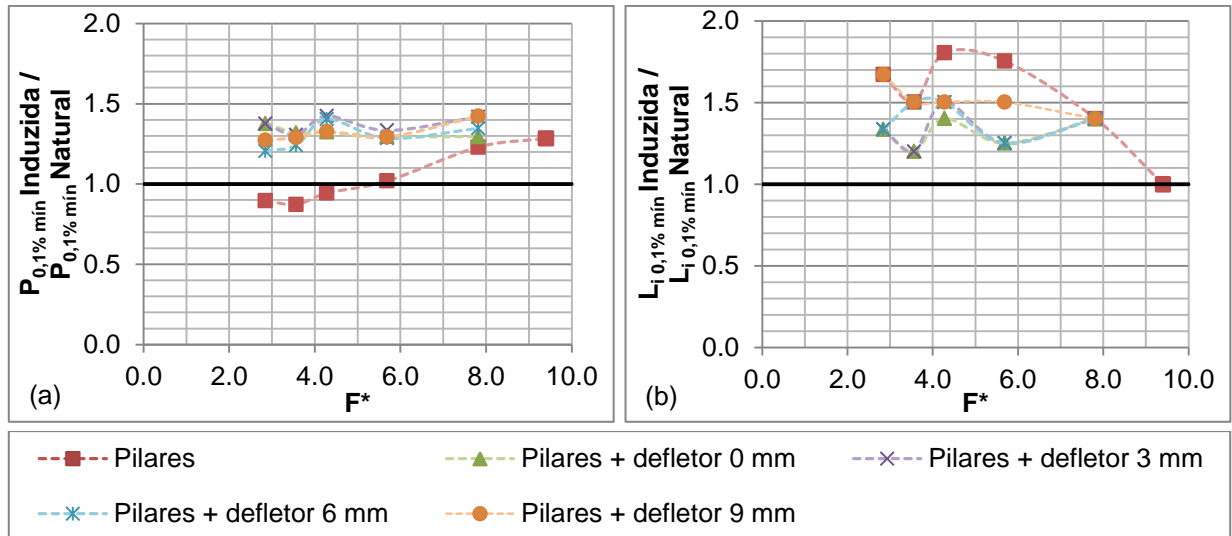


Figura 125 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos espelhos

A partir da análise da Figura 125 (a), para os espelhos, a relação entre as pressões extremas mínimas associadas à probabilidade de não-excedência de 0,1% da aeração induzida e da aeração natural mostrou que apenas para a aeração induzida por pilares e número de Froude rugoso inferior a 5,6 apresentaram valores inferiores ou iguais a 1,0, para as outras configurações e condições de ensaio os valores foram superiores. Isso demonstra que apenas para os menores números de Froude rugosos e conseqüentemente, menores vazões específicas, a aeração induzida por pilares apresentou o menor valor de pressões extremas mínimas superiores ao encontrada na aeração natural, indicando que o ar incorporado através dos pilares amorteceu as pressões extremas mínimas.

A relação entre a posição longitudinal em que ocorre a menor pressão extrema mínima apresentou valores superiores a 1,0 para todas as configurações de aeração induzida e números de Froude rugoso, conforme pode-se visualizar na Figura 125 (b), indicando que para a aeração induzida e números de Froude rugoso entre 2,8 a 9,4, a menor pressão extrema mínima ocorreu sempre a jusante da aeração natural.

#### 4.2.9 Comportamento das maiores pressões extremas máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% dos patamares e espelhos dos degraus

Na Figura 126 (a) e (b) estão apresentados o comportamento dos maiores valores de pressão extrema máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) e na Figura 127 (a) e (b) as posições em que ocorrem os maiores valores de pressões dos patamares comparando a aeração natural com a aeração induzida por pilares (Figura 126 e Figura 127 (a)) e a aeração natural com as diferentes configurações de aeração induzida por pilares + defletor (Figura 126 e Figura 127 (b)).

Na Figura 126 e na Figura 127 não estão representadas os valores das maiores  $P_{99,9\%}$ , para as maiores vazões específicas, pois, a partir da análise dos maiores valores de pressões extremas máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9%, percebeu-se que a vazão específica de 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, para as configurações de aeração natural e aeração induzida por pilares e as vazões específicas de 0,330 e 0,356 m<sup>3</sup>/s/m, para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores, a aeração do escoamento ocorreu à jusante dos patamares instrumentados, desta forma, a maior carga de pressão não foi medida.

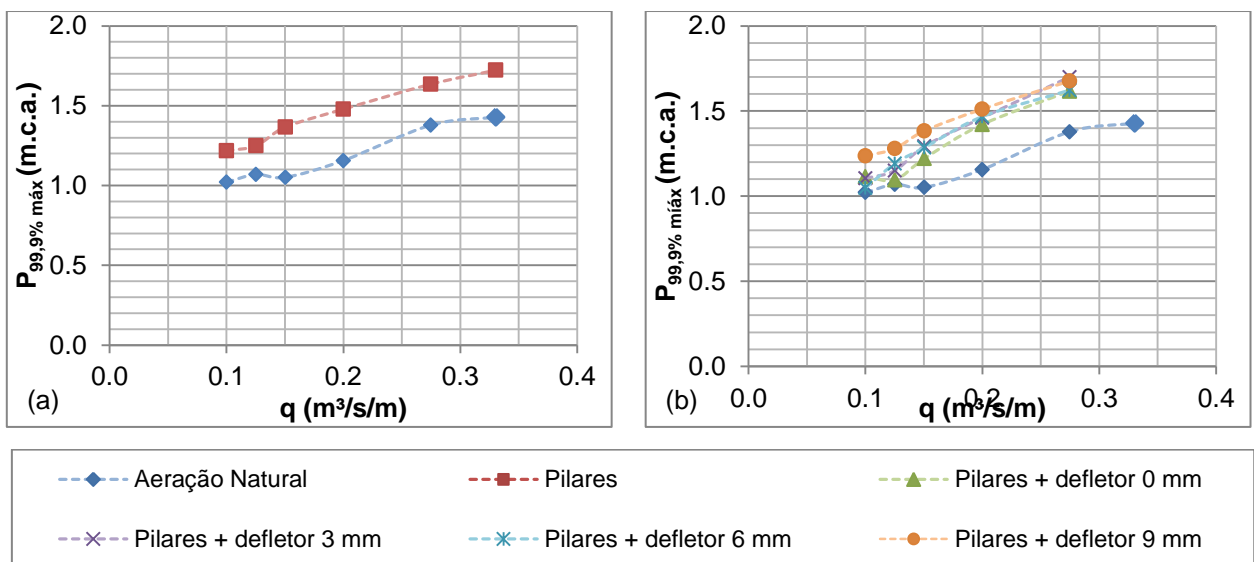


Figura 126 - Comportamento das pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos patamares



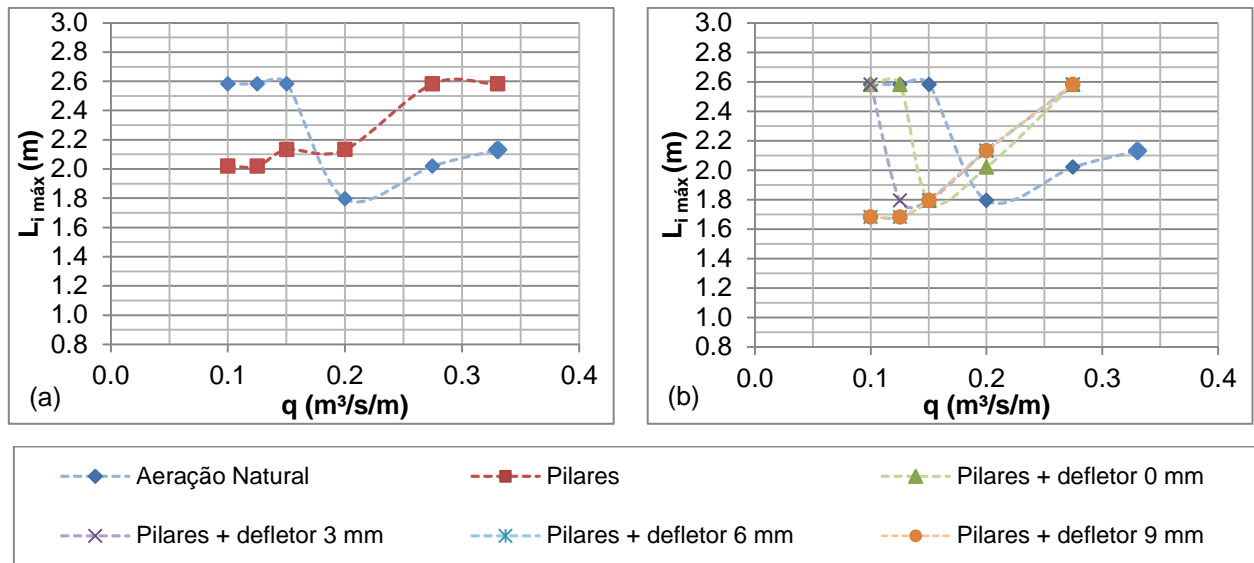


Figura 127 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos patamares

A partir da visualização da Figura 126 percebe-se que os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  crescem com o aumento da vazão específica para a aeração natural e para as configurações de aeração induzida. Os valores das maiores  $P_{99,9\%}$  apresentaram-se próximos entre si para a aeração induzida por pilares e para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores, sendo esses valores superiores à aeração natural, no entanto, a diferença entre as maiores cargas de  $P_{99,9\%}$  da aeração natural e induzida aumenta com o aumento da vazão específica, pois para as vazões de 0,100 e 0,125  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  apresentaram valores próximos.

Em relação à posição longitudinal em que ocorre a maior  $P_{99,9\%}$ , a partir da Figura 127, percebe-se que para a aeração natural e vazões específicas entre 0,100 a 0,150  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para a aeração induzida por pilares + defletor 0 mm e vazões específicas de 0,100 e 0,125  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  e para a aeração induzida por pilares + defletor 3 mm e vazão específica de 0,100  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  ocorrem no fim da calha em degraus, na posição longitudinal de 2,60 m. Isso está relacionado com a posição em que ocorre a aeração superficial, ou seja, quando o escoamento aera superficialmente no início da calha as cargas de pressões tendem a continuar crescendo suavemente até o fim da calha, porém, a diferença entre as cargas de pressões são pequenas.

Com exceção das menores vazões específicas, as maiores cargas de pressões ocorrem na região próxima à aeração do escoamento superficial parcial, sendo assim, com o aumento da vazão específica, a posição longitudinal em que ocorre a maior pressão máxima se desloca para jusante.

Na Figura 128 (a) e (b) estão apresentados o comportamento dos maiores valores de pressão extrema máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) e na Figura 129 (a) e (b) as posições em que ocorrem os maiores valores de pressões dos espelhos comparando a aeração natural com a aeração induzida por pilares (Figura 128 e Figura 129 (a)) e a aeração natural com as diferentes configurações de aeração induzida por pilares + defletor (Figura 128 e Figura 129 (b)).

Na Figura 128 e na Figura 129 não estão representadas os valores das maiores  $P_{99,9\%}$ , para as maiores vazões específicas, pois, a partir da análise dos maiores valores de pressões extremas máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9%, percebeu-se que a vazão específica de 0,356  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para as configurações de aeração natural e aeração induzida por pilares e as vazões específicas de 0,330 e 0,356  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores, a aeração do escoamento ocorreu à jusante dos patamares instrumentados, desta forma, a maior carga de pressão não foi medida.

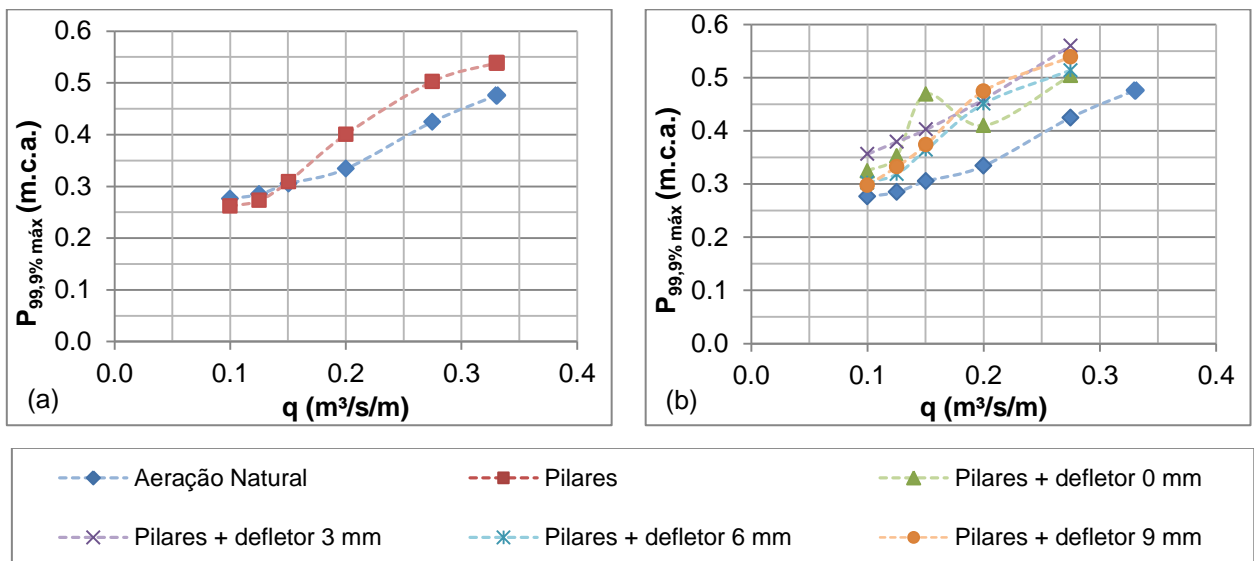


Figura 128 - Comportamento das pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos espelhos

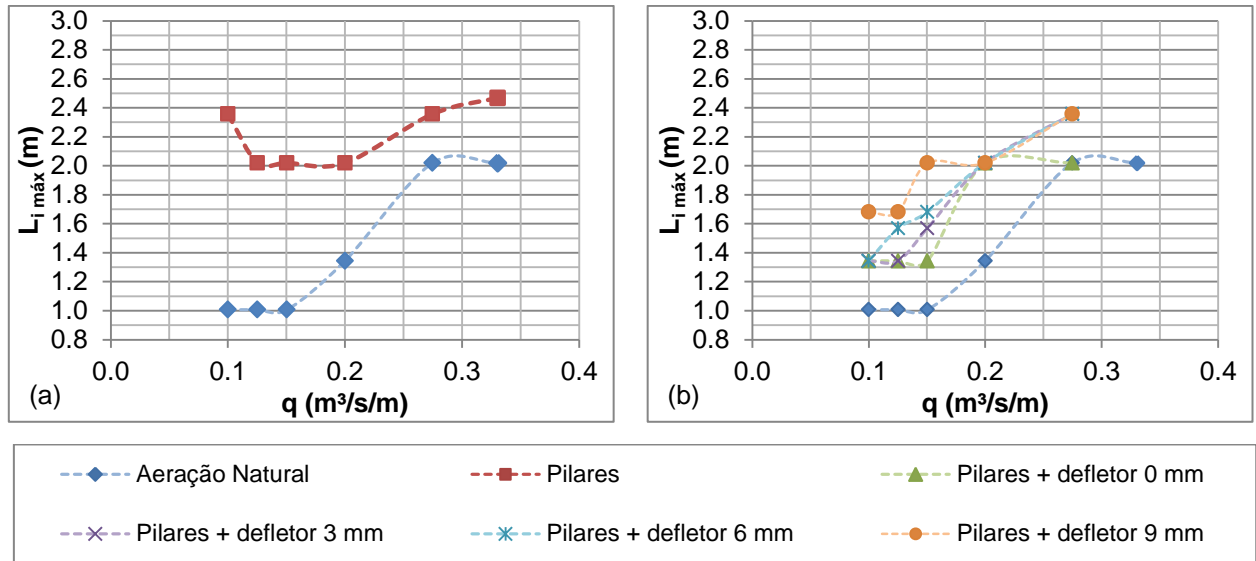


Figura 129 - Comportamento das posições em que ocorrem as pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos espelhos

Para os espelhos dos degraus, conforme Figura 128 (a) e (b), com o aumento da vazão específica, os maiores valores de carga de  $P_{99,9\%}$  crescem, da mesma forma que ocorre dos patamares, porém, com valores inferiores.

Para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  para a aeração induzida por pilares foram inferiores aos encontrados na aeração natural, porém muito próximos (Figura 128 (a)).

Já para as vazões específicas entre 0,200 a 0,330  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  da aeração induzida por pilares foram superiores a aeração natural, assim como para as outras configurações de aeração induzida por pilares + defletores (Figura 128 (b)), que apresentaram valores superiores para todas as vazões específicas, sendo que para as menores vazões específicas os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  são mais próximos da aeração natural.

A posição longitudinal em que ocorre os maiores valores de carga de  $P_{99,9\%}$ , está relacionada com a aeração superficial do escoamento. Para a aeração natural as maiores cargas de  $P_{99,9\%}$ , para as vazões específicas entre 0,100 a 0,150  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , ocorreram logo a jusante da ogiva Figura 129, visto que, a aeração do escoamento ocorreu nessa região e os valores de cargas de pressões com probabilidade de não-excedência decresceram. Com o aumento da vazão específica, a aeração superficial se desloca para jusante e, com isso, as maiores cargas de  $P_{99,9\%}$  também ocorrem mais a jusante.

Para a aeração induzida por pilares as maiores cargas de  $P_{99,9\%}$  ocorrem sempre a jusante da aeração natural, como observa-se na Figura 129 (a), e, entre as posições longitudinais de 2,00 a 2,50 m, visto que as posições da aeração superficial parcial ocorreram nesta região para essas vazões específicas.

As configurações de aeração induzida por pilares + defletor apresentaram uma tendência similar entre si para as posições longitudinais em que ocorrem as maiores cargas de  $P_{99,9\%}$  e, essa tendência também foi similar a aeração natural, no entanto, ocorreram a jusante, pois as posições de início de aeração superficial parcial ocorreram a jusante para as configurações com aeração induzida.

Na Figura 130 (a) a (f) pode-se visualizar a comparação do comportamento das posições longitudinais em que ocorrem as maiores cargas de  $P_{99,9\%}$  para os patamares e espelhos dos degraus.

A partir da comparação das posições em que ocorreram os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  entre patamares e espelhos percebe-se que para aeração natural e aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm são poucas vazões específicas em que a região é próxima, 0,275 e 0,330  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  para a aeração natural e 0,200  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  para a aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm.

Para a aeração induzida por pilares e pilares + defletor de 3, 6 e 9 mm a região que ocorre o maior valor de  $P_{99,9\%}$  para os patamares e espelhos é a mesma para maioria das vazões específicas, com exceção das vazões específicas de 0,100 e 0,125  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$  para a aeração induzida por pilares + defletor de 3 mm.

A partir da análise dos dados obtidos nos ensaios foi possível generalizar os resultados, através de adimensionais, de maneira a permitir uma estimativa das maiores pressões máximas com probabilidade de 99,9% de ocorrência e a posição longitudinal em que as mesmas ocorrem em um vertedouro em degraus com aeração induzida.

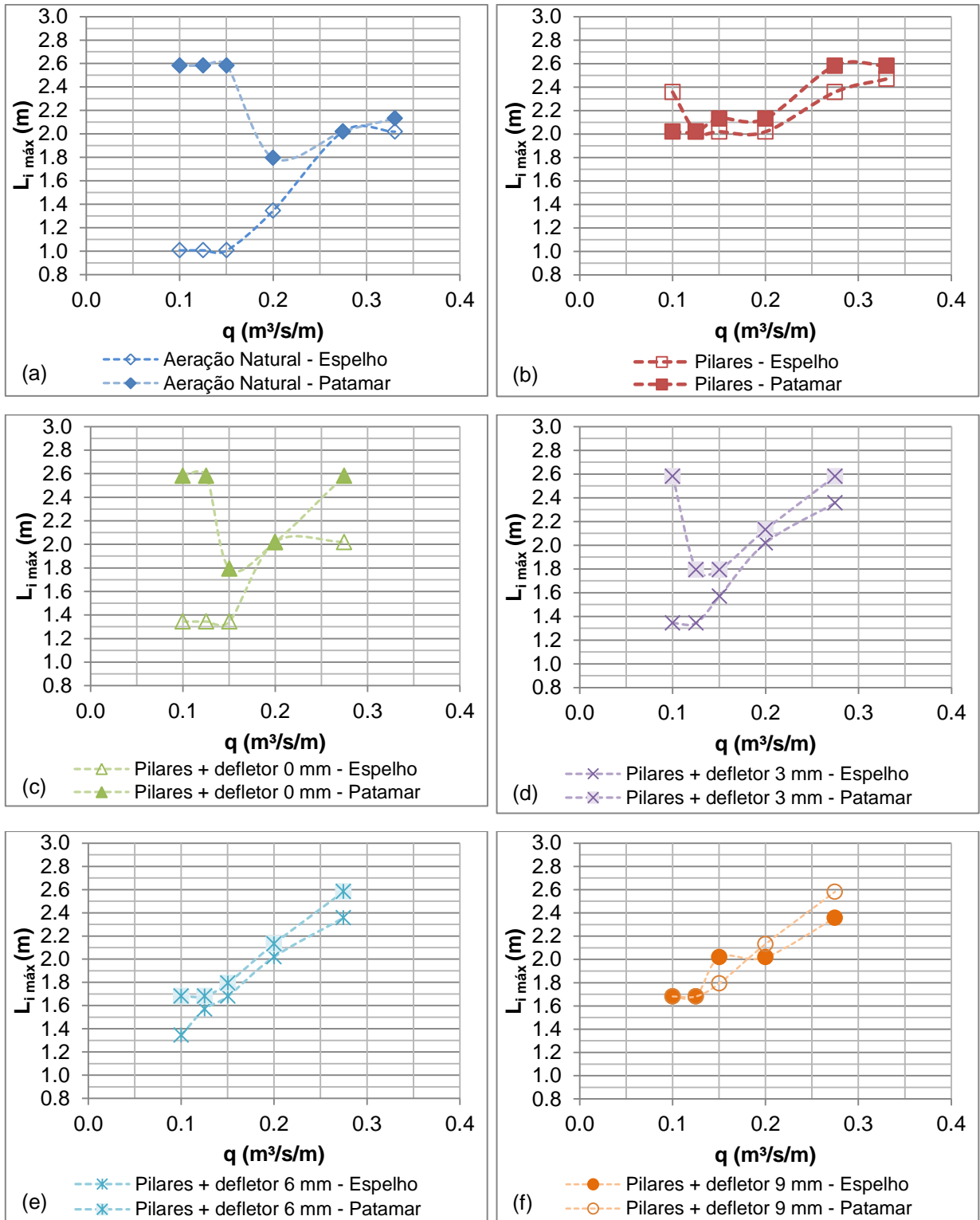


Figura 130 - Comparação entre a posição longitudinal em que ocorre a maior pressão máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) nos espelhos e patamares

Na Figura 131 (a) e (b) apresenta o comportamento dos maiores valores de pressão máxima com probabilidade de 99,9% de ocorrência para o patamar e o espelho, respectivamente, adimensionalizadas pela profundidade do escoamento no

primeiro degrau ( $h_0$ ) e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso do degrau ( $F^*$ ). Para o conjunto de dados dos patamares e dos espelhos ajustou-se uma curva e gerou-se uma equação. Para cada conjunto de dados, patamares e espelhos, ajustou-se uma curva, também representada na Figura 131 (a) e (b), e, gerou-se uma equação, considerando todas as configurações de aeração induzida, já que os dados não apresentam dispersão entre si.

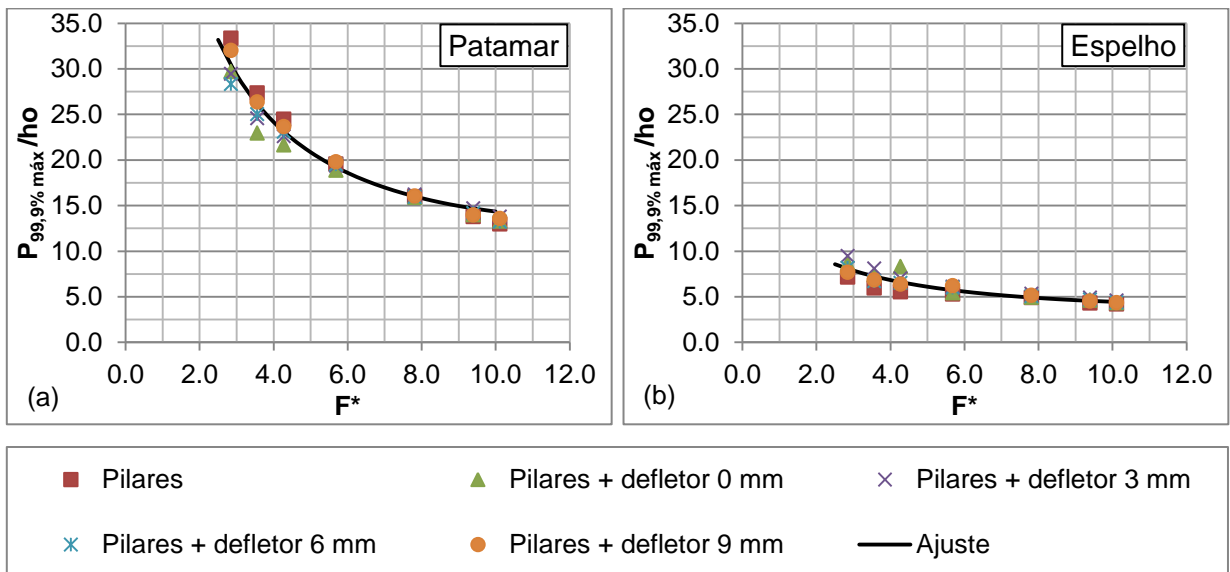


Figura 131 - Comportamento dos adimensionais dos maiores valores de pressão máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% de ocorrência para (a) patamar e (b) espelho

A função que melhor adequou-se para representar os adimensionais dos maiores valores de pressão máxima com probabilidade de 99,9% de ocorrência dos patamares e dos espelhos, e o número de Froude rugoso foi a função quadrática recíproca, representada pela Equação 13. Os coeficientes (a, b e c) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais adimensionalizados estão apresentados na Tabela 11.

$$\frac{P_{99,9\% \text{ máx}}}{h_0} = \frac{1}{(a + b \cdot x + c \cdot x^2)}$$

Equação 13

Tabela 11 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 13 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos patamares e espelhos

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Patamar	0,0077	0,0100	-0,0004	0,9484
Espelho	0,0583	0,0256	-0,0009	0,7445

As equações potenciais ajustadas para as maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% para os patamares e espelhos apresentam bons coeficientes de correlação com dados experimentais, indicando que este adimensional permitiu uma previsão aproximada do maior valor de  $P_{99,9\%}$  para um determinado protótipo de vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e defletores.

Na Figura 132 (a) e (b) apresenta o comportamento das posições longitudinais em que ocorreram os maiores valores de pressão máxima com probabilidade de 99,9% de ocorrência para os patamares e os espelhos, respectivamente, adimensionalizadas pela profundidade do escoamento no primeiro degrau ( $h_0$ ) e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso do degrau ( $F^*$ ). Para cada conjunto de dados, patamares e espelhos, ajustou-se uma curva, também representada na Figura 132 (a) e (b), e, gerou-se uma equação, considerando todas as configurações de aeração induzida, já que os dados não apresentam dispersão entre si.

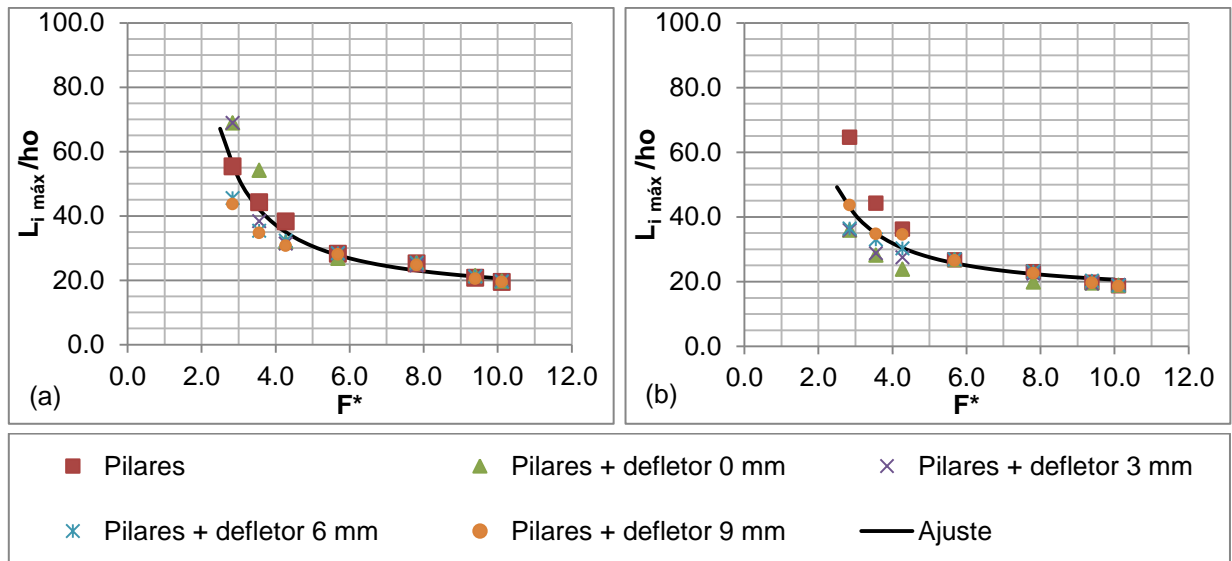


Figura 132 - Comportamento dos adimensionais das posições em que ocorrem as maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% dos espelhos para (a) patamar e (b) espelho

A função que melhor adequou-se para representar os adimensionais das posições longitudinais em que ocorrem os maiores valores de pressão máxima com probabilidade de 99,9% de ocorrência dos patamares e dos espelhos, e o número de Froude rugoso foi a função de exponencial modificada, apresentada na Equação 14. Os coeficientes (a e b) e o coeficiente de correlação entre a curva ajustada e os dados experimentais adimensionalizados estão apresentados na Tabela 12.

$$\frac{L_{i \text{ máx}}}{h_o} = a \cdot e^{b/F^*}$$

Equação 14

Tabela 12 – Coeficientes a e b obtidos para a Equação 14 e o coeficiente de correlação ( $R^2$ ) para a previsão das posições longitudinais em que ocorrem as maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% ( $P_{99,9\%}$ ) dos patamares e espelhos

	a	b	$R^2$
Patamar	13,9377	3,9293	0,7819
Espelho	15,4388	2,8994	0,6039

As equações exponenciais modificadas ajustadas para as posições longitudinais em que ocorrem as maiores pressões máximas com probabilidade de não-excedência de 99,9% para os patamares e espelhos apresentam valores de coeficientes de correlação 0,7819 e 0,6039, para os patamares e espelhos,



respectivamente, indicando que este adimensional permiti uma previsão aproximada da posição em que ocorre o maior valor de  $P_{99,9\%}$  para um determinado protótipo de vertedouro em degraus com aeração induzida por pilares e defletores.

Para verificar a influência da aeração induzida no comportamento das pressões extremas máximas, em relação à aeração natural, os maiores valores de pressões extremas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% e a posição em que os mesmos ocorrem para as diferentes configurações de aeração induzida foram divididos pelos valores em que ocorrem no escoamento com a aeração natural.

Na Figura 135 (a) e (b) estão apresentados, para os patamares, o comportamento da relação entre aeração induzida e a aeração natural da pressão extrema máxima  $P_{99,9\%}$  e da posição em que o mesmo ocorre, respectivamente, e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso.

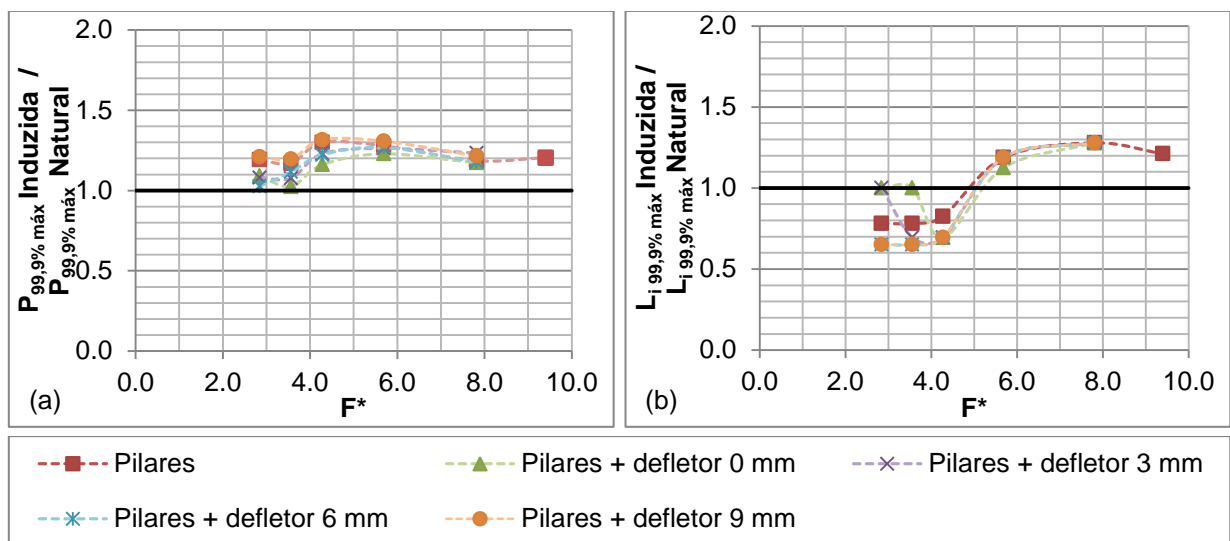


Figura 133 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos patamares

A relação das pressões extremas máximas associadas a probabilidade de não-excedência de 99,9%, entre as configurações de aeração induzida e aeração natural, para os patamares, apresentaram valores superiores a 1,0 para todas as configurações de aeração induzida e números de Froude rugoso entre 2,8 a 9,4, conforme pode-se visualizar na Figura 135 (a), pois os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  foram superiores a aeração natural, indicando que com a implementação de pilares e pilares + defletores as cargas de pressões máximas não reduziram.

Para os patamares, a relação da posição longitudinal em que ocorre os maiores valores de  $P_{99,9\%}$  apresentaram valores inferiores e iguais a 1,0 entre os números de Froude rugoso 2,8 a 4,3 e valores superiores a 1,0 para números de Froude rugoso entre 5,6 a 9,4. Ou seja, a aeração induzida e números de Froude rugoso pequenos a menor pressão máxima ocorreu a montante da aeração natural e para os maiores números de Froude rugoso a pressão extrema máxima ocorreu a jusante da aeração natural.

Na Figura 134 (a) e (b) estão apresentados, para os espelhos, o comportamento da relação entre aeração induzida e a aeração natural da pressão extrema máxima  $P_{99,9\%}$  e da posição em que o mesmo ocorre, respectivamente, e no eixo das abcissas o número de Froude rugoso.

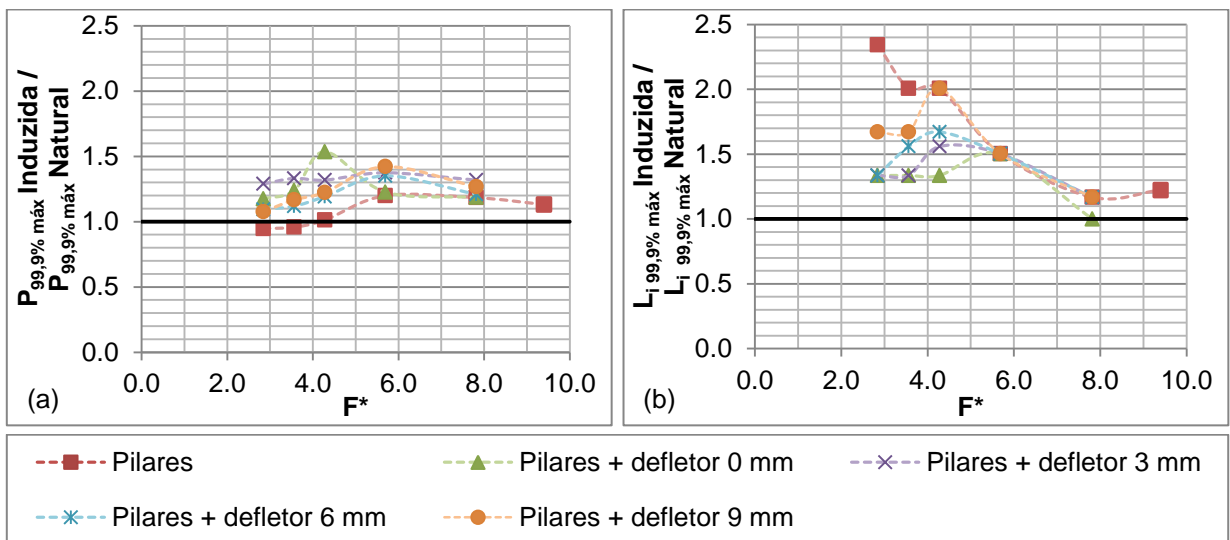


Figura 134 – Influência da aeração induzida em relação à aeração natural (a) no comportamento dos menores valores de pressões extremas máximas associadas à probabilidade de não-excedência de 99,9% e (b) da posição em que ocorre a mesma nos espelhos

A partir da análise da Figura 134 (a), apenas os espelhos da aeração induzida por pilares e números de Froude rugoso entre 2,8 a 4,3 apresentaram valores inferiores e iguais a 1,0, ressaltando que a incorporação de ar através dos pilares reduziu as maiores cargas de pressão extrema máxima. Já para a aeração induzida por pilares com números de Froude rugoso superiores a 5,6 e para as outras configurações de aeração induzida por pilares + defletores, os valores foram superiores a 1,0.

A relação entre a posição longitudinal em que ocorre a maior pressão extrema máxima apresentou valores superiores a 1,0 para todas as configurações de

aeração induzida e números de Froude rugoso, conforme pode-se visualizar na Figura 134 (b), indicando que para a aeração induzida e números de Froude rugoso entre 2,8 a 9,4, a maior pressão extrema máxima ocorreu sempre a jusante da aeração natural.

### 4.3 Comparações dos resultados

A fim de comparar os resultados dos parâmetros calculados com base nas medições de pressão da configuração com aeração induzida por pilares do presente estudo se utilizou os dados do estudo de Calitz (2015), que analisou em um modelo reduzido a implementação de um pilar na ogiva do vertedouro.

Na Figura 135 (a) e (b) estão apresentadas a comparação entre o comportamento das pressões mínimas ao longo do vertedouro em degraus para o modelo do LAHE e para o modelo de Calitz (2015), a partir de dados de modelo, para as configurações sem pilar Figura 135 (a) e com pilar Figura 135 (b).

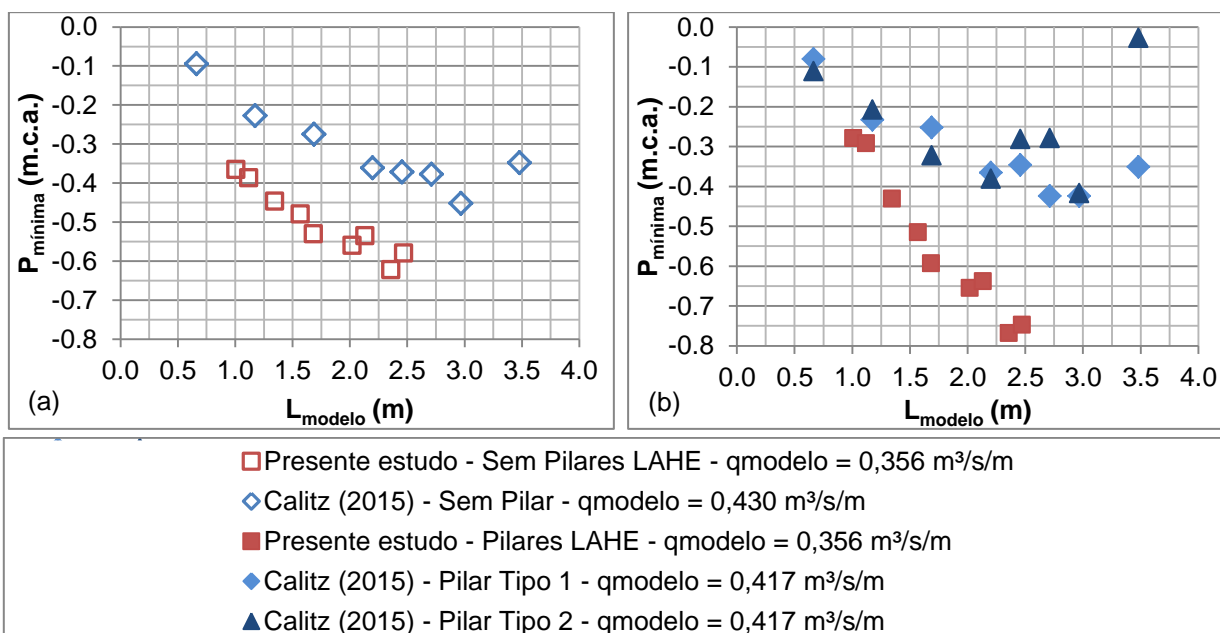


Figura 135 - Comparação do comportamento das pressões mínimas ao longo dos modelos de vertedouros em degraus do LAHE e do estudo de Calitz (2015).

A partir da análise dos dados de pressão mínima para a aeração natural, ou seja, sem pilar, e para a aeração induzida por pilares percebe-se que os valores de pressão mínima do presente estudo apresentam-se inferiores aos valores de pressão mínima do estudo de Calitz (2015).

No entanto, percebe-se que o comportamento é similar, pois em ambos os modelos, os valores de pressões mínimas decresceram até a posição em torno do ponto de início de aeração, apesar de que para o modelo do LAHE e vazão específica de  $0,356 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , o escoamento aerou no fim da calha em degraus e as

cargas de pressões mínimas não cresceram ou estabilizaram, como ocorreu no modelo de Calitz (2015).

Para a modelo sem pilares as pressões mínimas do modelo do LAHE foram inferiores em torno de 0,20 m.c.a. que as pressões mínimas do modelo de Calitz (2015) e em média de 0,30 m.c.a. para o modelo com pilares, comparando vazões específicas em modelo similares.

A razão para essa diferença pode ser em virtude da análise estatística realizada por Calitz (2015), em que as pressões mínimas, representado pelo percentil de 0,15%, foram definidas a partir de três desvios padrão da média, assumindo que o conjunto de dados segue uma distribuição normal. Apesar de seguir a mesma metodologia de análise estatística que o autor, para a comparação dos valores de pressões mínimas, os dados do presente estudo para o modelo do LAHE não seguem uma distribuição normal, pois os valores de assimetria e curtose não assumem o valor esperado para uma distribuição normal, como visto na Figura 136 (a) e (b).

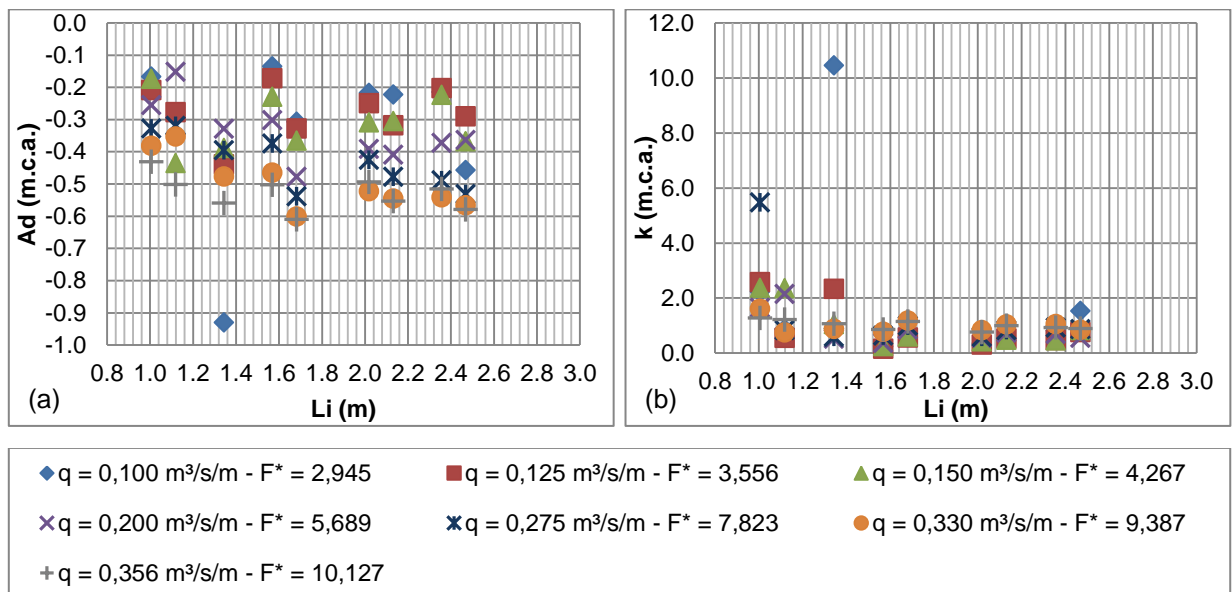


Figura 136 – (a) Coeficiente de assimetria, (b) coeficiente de curtose para a aeração induzida por pilares do modelo do LAHE

Outra diferença da análise dos dados de ambos os modelos foi referente às vazões, para o presente estudo a vazão específica foi constante para as diferentes configurações, já Calitz (2015) manteve constante a altura de água na ogiva, oscilando a vazão específica, pois com a introdução do pilar, a largura efetiva da

ogiva reduziu, provocando um aumento da altura de água neste local, quando comparado ao modelo sem pilar. E, isso pode explicar, para o modelo do LAHE, os menores valores de carga de pressão mínima para a aeração induzida por pilares, quando comparado aos valores da aeração natural, ou seja, sem pilares. Já que quando se compara as configurações sem e com pilar para o modelo de Calitz (2015) verifica-se que, embora as configurações com pilar Tipo 1 e Tipo 2 apresentaram valores superiores, os valores são próximos a configuração sem pilar.

A ogiva do modelo físico da pesquisa de Calitz (2015) possui degraus de transição e, uma das recomendações do seu trabalho é comparar os resultados entre um modelo com uma ogiva com perfil típico e com degraus de transição, pois os degraus de transição podem influenciar, pois parte inferior do escoamento é perturbada. Esse também pode ser uma das causas para a diferença com os resultados do presente estudo, já que o modelo físico possui uma ogiva com perfil típico.

Embora os vertedouros em degraus possuam tamanhos dos degraus semelhantes, essa diferença somada com a diferença entre as posições de instalação dos transdutores podem influenciar na diferença entre as pressões.

A partir dos resultados de Calitz (2015), o pilar permite a separação do escoamento, formando uma cavidade de ar próxima as laterais dos pilares, e, para que esse ar seja introduzido nas cavidades do degrau, deve existir um diferencial de pressão, portanto é necessário que não ocorra ou que ocorra o mínimo de impacto do escoamento no patamar. E, isso foi alcançado com o pilar em que a sua extremidade final termina dentro da ogiva (Tipo 1), pois a separação do escoamento criada pelo pilar se estende até os degraus, permitindo que grande volumes de ar sejam arrastados para dentro da cavidade dos degraus. No entanto, a extremidade final do pilar ensaiado no presente estudo termina no primeiro degrau da calha do vertedouro e, com isso, a introdução do ar nas cavidades dos degraus pode não ser eficiente e isso refletir nas pressões mínimas ao longo da calha em degraus.

Outra diferença quanto aos pilares dos modelos físicos é em relação à instalação, onde no modelo de Calitz (2015) o pilar foi instalado no centro da calha e as pressões comparadas com o presente estudo foram coletadas nas laterais do modelo, para minimizar a influência do pilar, no entanto são influenciadas pelas paredes do modelo.

Com isso, apesar dos modelos possuírem características físicas semelhantes, esses pontos podem ter influenciados na diferença dos valores de carga de pressão mínima.

## 5 CONCLUSÕES

A partir da avaliação das características do comportamento do escoamento dos modelos físicos LOH I e LAHE constatou-se que o escoamento com aeração induzida difere do comportamento da aeração natural, em virtude da instalação dos pilares e defletores na calha em degraus, que provocam uma descontinuidade no escoamento e permitem a incorporação de ar na parte inferior do escoamento, antes do início da aeração superficial do escoamento.

A aeração induzida por pilares possui duas regiões características do escoamento: a aeração inferior e a aeração da superfície do escoamento. A aeração inferior inicia-se a partir das cavidades formadas nas laterais do vertedouro, devido ao alargamento da calha, no início da calha em degraus. A aeração superficial parcial ocorre quando toda a lâmina de água está aerada e é pouco influenciada pelo aumento da vazão específica, pois a posição longitudinal em que a mesma ocorre é, praticamente, estável, sendo que para as vazões específicas entre 0,100 e 0,200 m<sup>3</sup>/s/m, a posição longitudinal de início de aeração superficial parcial foi antecipada em relação à aeração natural.

O comportamento da aeração induzida por pilares + defletor de 0 mm foi similar à aeração natural, pois o defletor possui o mesmo ângulo do pseudo-fundo da calha e acaba funcionando como uma extensão da ogiva. O desenvolvimento da aeração inferior do escoamento ocorre apenas nas laterais e não é suficiente para alcançar o centro da calha, como ocorreu na aeração induzida por pilares, demonstrando que a disposição dos pilares até o primeiro degrau influencia na incorporação de ar, já que para a aeração induzida por pilares o ar foi incorporado. O comportamento da aeração superficial parcial do escoamento foi semelhante ao da aeração natural, crescendo linearmente, com o aumento da vazão específica, no entanto, ocorreu em posições à jusante.

Para as configurações com aeração induzida por pilares + defletor 3, 6 e 9 mm, o comportamento do escoamento foi semelhante, apesar das posições características ocorrerem em posições longitudinais distintas. Esse comportamento também foi similar ao comportamento obtido no modelo do LOH I para aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm, no entanto, como a largura da calha é menor, a concentração de ar é maior e mais uniforme, quando comparado ao escoamento do modelo LAHE.



Como os defletores possuem ângulo diferente do pseudo-fundo, primeiramente, ocorre a região caracterizada pela formação do jato, que inicia a partir do final do defletor e termina quando o jato impacta os degraus do defletor, sendo que o jato é influenciado pela espessura do defletor e, de maneira menos significativa, pela vazão específica. A aeração inferior inicia a partir do impacto do jato de água no degrau e se desenvolve pela incorporação de ar formada pelas cavidades laterais e cavidade inferior formada pelo lançamento do jato. A aeração superficial parcial para essas configurações ocorreu em posições longitudinais próximas, no entanto, a jusante da posição de início de aeração da aeração natural.

A posição de início da aeração inferior para a aeração induzida por pilares ocorre à montante da posição de início de aeração inferior da aeração induzida por pilares + defletores e, também, a concentração de ar nessa região é mais uniforme para a aeração induzida por pilares. Para a aeração induzida por pilares + defletores a partir do impacto do jato de água nos degraus a concentração de ar diminui até a posição de início de aeração superficial e no centro da calha em degraus a concentração de ar é inferior quando comparada visualmente com a concentração de ar das laterais da calha, em virtude, das cavidades laterais formadas pela presença dos pilares, no entanto, o ar não alcança o centro da calha.

Embora a aeração superficial do escoamento para as diferentes configurações de aeração induzida ocorra mais a jusante, quando comparada à aeração natural, os pilares e defletores com ângulo diferente do pseudo-fundo da calha em degraus formam uma cavidade lateral e inferior, permitindo a incorporação de ar na parte inferior do escoamento, anterior ao início da aeração superficial. Desta forma, o ar presente na parte inferior do escoamento, a montante da posição de início de aeração superficial, pode proteger a estrutura de possíveis danos por cavitação, em virtude da mistura bifásica ar-água.

A partir da caracterização das distribuições de pressões verificadas experimentalmente nos patamares e nos espelhos dos degraus do modelo físico LOH I, verificou-se que, de maneira geral, a aeração induzida por pilares + defletor de 6 mm amortece as cargas de pressões ou as mantém próximas das cargas de pressões obtidas na aeração natural do escoamento.

As cargas de pressões médias no início da calha em degraus do modelo LOH I foram amortecidas, quando comparadas ao escoamento com aeração natural, apresentando valores próximos de 0 m.c.a., pois o escoamento é lançado sobre os

degraus quando entra em contato com o defletor, ou seja, não há presença de escoamento nesta região. Para os espelhos, na região da aeração inferior e superior do escoamento, as cargas de pressões médias para a aeração induzida apresentaram-se próximas da aeração natural, mostrando que o ar incorporado através da instalação dos pilares e defletor não influenciaram as cargas de pressões médias dos espelhos.

No entanto, para os patamares, na região da aeração inferior as cargas de pressões médias para a aeração induzida apresentaram superiores à aeração natural, pois apenas o ar da parte inferior do escoamento não é suficiente para amortecer as cargas de pressões médias e o que prevalece é o aumento da altura de água, em virtude do estreitamento da calha com a presença dos pilares. A partir da posição de início de aeração superficial as cargas de pressões médias da aeração induzida decresceram e a jusante da posição em que as duas configurações estão aeradas superficialmente, as cargas de pressões médias se aproximaram, podendo-se inferir que nesta região a quantidade de ar presente no escoamento é, praticamente, igual para as duas configurações.

Através da análise das cargas de flutuações de pressões para os patamares e espelhos dos degraus da calha com aeração induzida do modelo LOH I, pode-se inferir que, de maneira geral, a incorporação de ar através dos pilares e do defletor de 6 mm, atenuou as cargas de flutuação de pressões na região do lançamento do escoamento e na região da aeração inferior escoamento, devido aos pilares e defletor, que permitem a incorporação de ar na parte inferior do escoamento. A jusante do início da aeração superficial parcial, ou seja, quando em ambas as configurações o escoamento está totalmente desenvolvido e a quantidade de ar presente no escoamento é semelhante, as cargas de pressões flutuantes das duas configurações se aproximam.

As cargas de pressões extremas mínimas, com probabilidade de não excedência de 0,1% e 1,0%, e máximas, com probabilidade de não excedência de 99,0% e 99,9%, para a aeração induzida do modelo LOH I foram amortecidas, quando comparadas à aeração natural, na região que ocorre o lançamento do escoamento e na região da aeração inferior, em virtude da presença do ar na parte inferior do escoamento. Na região em que as duas configurações estão aeradas superficialmente, em virtude do ar incorporado ao escoamento ser semelhante, as

cargas de pressões extremas mínimas e máximas apresentam valores próximos para as duas configurações.

Com isso, os pilares instalados nas laterais do vertedouro e o defletor de 6 mm instalado no primeiro degrau do vertedouro do modelo LOH I aumentam a concentração de ar incorporado ao escoamento antes da posição de início da aeração superficial, influenciando nas cargas de flutuação de pressão e pressões extremas mínimas e máximas, as quais foram amortecidas, quando comparadas às cargas de pressões da aeração natural.

No entanto, a distância entre pilares influencia na concentração de ar inferior desenvolvida a partir dos pilares e o modelo LOH I possui uma distância entre pilares pequena, quando comparada à distância entre pilares normalmente utilizada em estruturas reais. Portanto, o comportamento da concentração de ar inferior do escoamento e das pressões do modelo LOH I pode não representar o comportamento de um vertedouro em degraus com distância entre pilares maior. Desta forma, para confrontar essa constatação utilizou-se o modelo do LAHE que possui largura entre pilares maior e próxima da largura normalmente utilizada em vertedouros.

Na região em que ocorre o lançamento do escoamento e impacto do jato d'água, para as configurações de aeração induzida por pilares + defletores do modelo LAHE, as cargas de pressões médias dos patamares apresentam-se dispersas. No lançamento do escoamento, as cargas de pressões se aproximam de 0 m.c.a. e, no momento do impacto do jato de água as cargas de pressões se elevam, sendo que, para os defletores com maior espessura, a energia com que a água impacta o patamar do degrau é maior.

A incorporação de ar na parte inferior do escoamento para a aeração induzida do modelo LAHE, de maneira geral, não amorteceu as cargas de pressões médias dos patamares dos degraus, quando comparado às cargas de pressões médias da aeração natural, com exceção das menores vazões específicas ensaiadas para a aeração induzida por pilares, indicando que, apenas nesta condição, o ar incorporado ao escoamento foi suficiente para as cargas de pressões médias decrescessem, sendo que, para as outras condições, o que prevalece é o aumento da energia cinética, em função do estreitamento da calha pela presença dos pilares até o primeiro degrau.

A posição de início de aeração superficial influencia no comportamento das pressões médias dos patamares do modelo do vertedouro em degraus do LAHE, pois a jusante desta região as cargas de pressões médias decresceram e estabilizaram, sendo que para as menores vazões específicas as cargas de pressões médias estabilizam em valores próximos à aeração natural, indicando que a concentração de ar em ambas as configurações são semelhantes e para as maiores vazões específicas não se verificou esse comportamento, devido à altura da calha em degraus não ser suficiente para o desenvolvimento da aeração superficial do escoamento.

Para os espelhos dos degraus do vertedouro do LAHE as cargas de pressões médias comportam-se de maneira menos dispersa, quando comparada aos patamares, sendo que a maior dispersão também ocorre no início da calha em degraus, região de formação e impacto do jato de água, para a aeração induzida por pilares + defletores. Para a aeração induzida por pilares, no início da calha em degraus, as cargas de pressões médias dos espelhos foram amortecidas, em virtude, da maior incorporação de ar na parte inferior do escoamento. A partir da região de impacto do jato de água, pode-se concluir que as diferentes configurações de aeração induzida não influenciaram nos valores de cargas de pressões médias, pois os valores apresentaram-se próximos dos valores de carga de pressão média da aeração natural.

As cargas de flutuação de pressão dos patamares e dos espelhos para a aeração induzida do modelo LAHE apresentaram, de maneira geral, comportamento disperso no início da calha em degraus, porém, independente da configuração as mesmas crescem até a aeração superficial do escoamento e, posteriormente, decrescem, sendo que a aeração inferior não amorteceu as cargas de flutuação de pressão. Somente a jusante da posição de início da aeração superficial, quando a aeração do escoamento está totalmente desenvolvida, é que os valores de carga de flutuação de pressão da aeração induzida se aproximam da aeração natural.

As cargas de pressões extremas mínimas, com probabilidade de não excedência de 0,1% e 1,0%, e máximas, com probabilidade de não excedência de 99,0% e 99,9%, para os patamares e espelhos, da aeração induzida do modelo LAHE também são influenciadas pela região da formação do jato e a região em que ocorre a aeração superficial do escoamento.

No início da calha em degraus, na região em que ocorre o lançamento e impacto do jato nos degraus, os valores de carga de pressão extrema apresentaram-se dispersos, principalmente, devido às diferenças entre as geometrias dos dispositivos. A jusante desta região, a aeração induzida, apresenta valores próximos entre si, no entanto, apresentam valores mais extremos em relação à aeração natural. E, a partir da região em que ocorre a aeração superficial para a aeração induzida, que ocorre a jusante da aeração natural, é que os valores se aproximam em virtude da concentração de ar ser semelhante para todas as configurações.

Os menores valores de carga de pressão extrema mínima e os maiores valores de carga de pressão extrema máxima para os patamares e espelhos do modelo LAHE ocorreram para as configurações de aeração induzida, ou seja, de maneira geral, as cargas de pressões máximas não foram amortecidas com implantação dos dispositivos de incorporação de ar ao escoamento, apresentando-se mais extremas do que a aeração natural do escoamento. Com exceção das menores vazões específicas entre 0,100 a 0,150 m<sup>3</sup>/s/m, da aeração induzida por pilares, que o ar inferior incorporado ao escoamento através dos pilares foi suficiente para amortecer as cargas de pressões extremas mínimas e máximas.

De maneira geral, as posições longitudinais que ocorreram os menores e os maiores valores de pressões extremas mínimas e máximas para os patamares e espelhos da aeração induzida foram à jusante das posições longitudinais que ocorreram os valores mais extremos da aeração natural.

Com isso, pode-se dizer que para o escoamento com aeração induzida perde-se calha em relação à aeração natural e isso pode ser corroborado a partir dos resultados da posição de início de aeração superficial do escoamento, que, também, ocorreram em posições longitudinais à jusante quando comparada à aeração natural e pelo comportamento das pressões.

A partir dos resultados do modelo LAHE pode-se inferir que os pilares e defletores não atenuam as cargas de pressões para uma calha em degraus, com distância entre pilares igual a 1 m em modelo, que representa uma distância de 10 m em protótipo. No entanto, a concentração de ar na parte inferior do escoamento, que está em contato com a estrutura, aumentou e, mesmo que a aeração superficial não tenha sido antecipada, a aeração inferior ocorreu à montante. E o ar presente na parte inferior do escoamento antes da posição de início de aeração superficial pode proteger o concreto de possíveis danos por erosão/cavitação, porém, é necessário

realizar análises de concentração de ar no escoamento com aeração induzida por pilares e defletores.

## 6 RECOMENDAÇÕES

A partir dos resultados obtidos nesta pesquisa recomenda-se que para trabalhos futuros os ensaios sejam realizados em um modelo físico de vertedouro em degraus com altura maior, para que seja possível verificar o comportamento das pressões a jusante da posição de início de aeração superficial. Além disso, recomenda-se que as características do escoamento e os esforços hidrodinâmicos sejam avaliados também para vazões específicas superiores às ensaiadas neste estudo, para avaliar o risco de ocorrência de cavitação e/ou erosão nos degraus do vertedouro.

Para o modelo físico do vertedouro em degraus do LAHE, não foi possível instrumentar todos os patamares e espelhos dos degraus, em virtude, do número insuficiente de transdutores disponíveis para a presente pesquisa, desta forma, recomenda-se que os esforços hidrodinâmicos sejam avaliados em todos os degraus para que se tenha conhecimento do comportamento ao longo de toda a calha em degraus.

Para estudos futuros com aeração induzida em vertedouro em degraus é necessária que a concentração de ar seja avaliada, pois, a partir das análises visuais do escoamento verificou-se que a concentração de ar aumentou com a implementação dos pilares e defletores e o ar incorporado ao escoamento pode proteger o concreto de possíveis danos por erosão e/ou cavitação. Desta forma, recomenda-se que a concentração de ar seja avaliada nas configurações de aeração induzida do presente estudo e, também, em outros dispositivos de aeração induzida.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADOR, A. **Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado**. 2005. Tese de doutoramento. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2005.

ARNDT, R. E. A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. **Annual Review of Fluid Mechanics**. v. 13, p. 273-328, 1981.

BAHENA, J. C. L.; ESTRADA, O. P.; MARTÍNEZ, V. M. O.; SÁNCHEZ, J. G. Experimental Investigation of Artificial Aeration on a Smooth Spillway with a Crest Pier. **Water**, v. 10, n. 10, 2018.

BORDEN, R. C.; COLGATE, D.; LEGAS, J.; SELANDER, C. E. **Documentation of operation, damage, repair, and testing of yellowtail dam spillway**. Bureau of Reclamation Report, p. 76, 1971.

BRITO, R. J. R. **Análise da aeração em escoamentos de altas velocidades em calhas de vertedores**. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BRITO, R. J. R.; SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. M. de; PUCHE, A. de A. S. Incorporação de ar por aeradores de fundo em escoamentos de alta velocidade em vertedores: Análise de dados e modelos. In: Congresso Latinoamericano de hidráulica, 14., 2010, Punta del Este. **Anais...** Punta del Este, Uruguay: IAHR, 2010.

CALITZ, J, A. **Investigation of air concentration and pressures of a stepped spillway equipped with a crest pier**. 2015. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Stellenbosch University, Stellenbosch, 2015.

CANELLAS, A. V. B. PRIEBE, P. S. DAI PRÁ, M. MARQUES, M. G. Influência da aeração induzida por pilares no escoamento em vertedouros em degraus. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 31., 2017, Belo Horizonte. **Anais...** Rio de Janeiro: SBDB, 2017.

CHANSON, H, YASUDA, Y., OHTSU, I. Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modeling. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 809-819, 2002.

CHANSON, H. Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**, vol. 32, n. 2, p. 213-218, 1994b.

CHANSON, H. Embankment overtopping protection systems. **Acta Geotechnica, Springer**, v. 10, p. 305-318, 2015.

CHANSON, H. History of stepped channels and spillways: a rediscovery of the "wheel". **Canadian Journal of Civil Engineering**, Canadá, v. 22, n. 2, p. 247- 259, 1995.



CHANSON, H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. **Dam Engineering**, vol. 11, n. 4, p. 205-242, 2001.

CHANSON, H. Hydraulic of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, Delft, v. 32, n. 3, p. 445-460, 1994a.

CONTERATO, E.; MARQUES, M. G.; ALVES, A. A. M. Proposta de uniformização das equações de previsão das características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 131-137, jan./mar. 2015.

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

DAI PRÁ, M. PRIEBE, P. S. SANAGIOTTO, D. G. MARQUES, M. G. Dissipação de energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de declividade 1V:1H. **Ingeniería del Agua**. v. 20, n. 1, p. 1-12, 2016.

FALVEY, H. T. **Cavitation in Chutes and Spillways**. Bureau of Reclamation Engineering Monograph, n. 42, Denver, EUA, 1990.

FRIZELL, K. W., RENNA, F. M., e MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 6, p. 630-636, jun. 2013.

GOMES, J. F. **Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H**. 2006 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GOMES, J. F.; MARQUES, M. G.; MATOS, J. Campo de Pressões Flutuantes em Vertedouros em Degraus sobre Barragens de Concreto. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo, SP: ABRH, 2007.

GONZALEZ, C. A.; TAKAHASHI, M.; CHANSON, H. An experimental study of effects of step roughness in skimming flows on stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**. v. 46, n. 1, p. 24-35, 2008.

KOEN, J. **Artificial aeration on stepped spillways with piers and flares to mitigate cavitation damage**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Stellenbosch University, Stellenbosch, 2017.

KOEN, J.; BOSMAN, D. E.; BASSON, G. R. Artificial aeration of stepped spillways by crest piers and flares for the mitigation of cavitation damage. **Journal of the South African Institution of Civil Engineering**. v. 61, n. 2, p. 28-38, 2019.

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

LOPARDO, R. A. Modelación física de flujo macroturbulento en estructuras hidráulicas. **Apuntes de Ingeniería**, v. 19, n. 2, p. 5-20, Santiago, Chile, 1996.

MATOS, J. de 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. **Emulsionamento de Ar e Dissipação de Energia do Escoamento em Descarregadores em Degraus**. 1999. 357 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 1999.

MATOS, J., QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M. Sobre a protecção contra a erosão de cavitação em descarregadores de cheias em degraus. **Recursos Hídricos**, v. 21, n. 3, p. 91-96, 2000.

MIGUEL, S. **Nova York, a metrópole com a água mais pura do planeta**. IEA – Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, São Paulo, 09 de set de 2016. Disponível em: <<http://www.iea.usp.br/noticias/nova-york-a-metropole-com-a-agua-mais-pura-do-planeta-1>>. Acesso em: 10 de jul. de 2019.

MOJTABA, S.; HABIB, M. J.; MAHMOOD, S. B.; ALIREZA, M.; 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. 2, n. 4, p. 11-16, 2015.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Discussion of Onset of the skimming flow on stepped spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 127, n. 6, p. 522-524, jun. 2001.

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, set. 2004.

OSMAR, F. M. **Análise de Esforços sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

OSMAR, F. M.; CANELLAS, A. V. B.; PRIEBE, P. S.; SARAIVA, L. S.; TEIXEIRA, E. D.; MARQUES, M. G. Anaysis of the longitudinal distribution of pressures near the ends of the vertical and horizontal faces in stepped spillway of slope 1V: 0.75H. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 23, e. 4, 2018.

Peterka, A. **The efect of entrained air on cavitation pitting**. **Hydraulic Engineer, Design and Construction Division**, Bureau of Reclamation. Denver, 1953.

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR H. Bottom Aeration of Stepped Spillways **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 8, p. 850-853, 2006a.

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

QUINTELA, A. C.; RAMOS, C. M. **Protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas**. Ministério da Habitação e Obras Públicas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 1980.

SANAGIOTTO, D. **Características do escoamento sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H**. 2003. 118 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SANCHEZ, M. **Comportamento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados em Presas de Hormigón Campactado. Análisis del Campo de Presiones**. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2001.

SIMÕES, A. L. A. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento**. 2008. 255 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 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.

TERRIER, S.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A. J. Comparison of chute aerator effect on stepped and smooth spillways. In: IAHR World Congress, 36., 2015, Hague, Netherlands. **Anais...** Netherlands: IAHR, 2015.

TERRIER, S.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A. J. Effect of deflector aerator on stepped spillway flow. In: International Symposium on Hydraulic Structures, 6., 2016, Portland, Oregon. **Anais...** Portland: Hydraulic Structures and Water System Management, 2016.

TOZZI, M. J. **Caracterização/comportamento de escoamentos em Vertedouros com Paramento em Degraus**. 1992. 302 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 1992.

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, n. 66. 1983.

VOLKART, P.; RUTSCHMANN, P. **Air entrainment devices (air slots)**, *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie*, ETH-Zurich, Switzerland, n. 72. 1984.

WANG, S.; HOU, D.; WANG, C. Aerator of stepped chute in Murum Hydropower Station. **Procedia Engineering**, v. 28, p. 803-807, 2012.

ZAMORA, A. S.; PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. Discussion of Hydraulic performance of step aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n.7, p. 621-622, 2009.

ZAMORA, A. S.; PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. Hydraulic performance of step aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 2, p.127–134, 2008.

## Apêndices

### Apêndice 1 – Comportamento das pressões médias dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

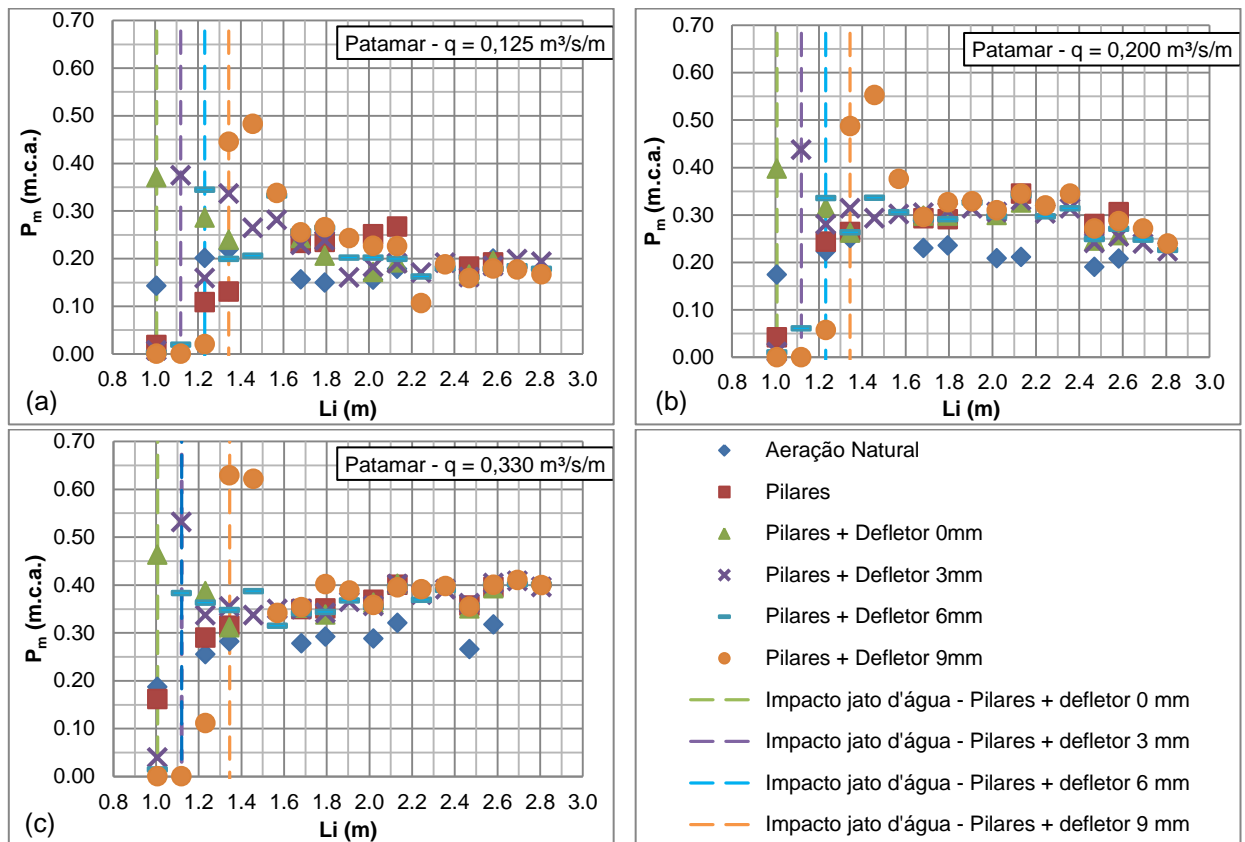


Figura 137 - Comportamento das pressões médias para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

**Apêndice 2 – Comportamento das pressões médias dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

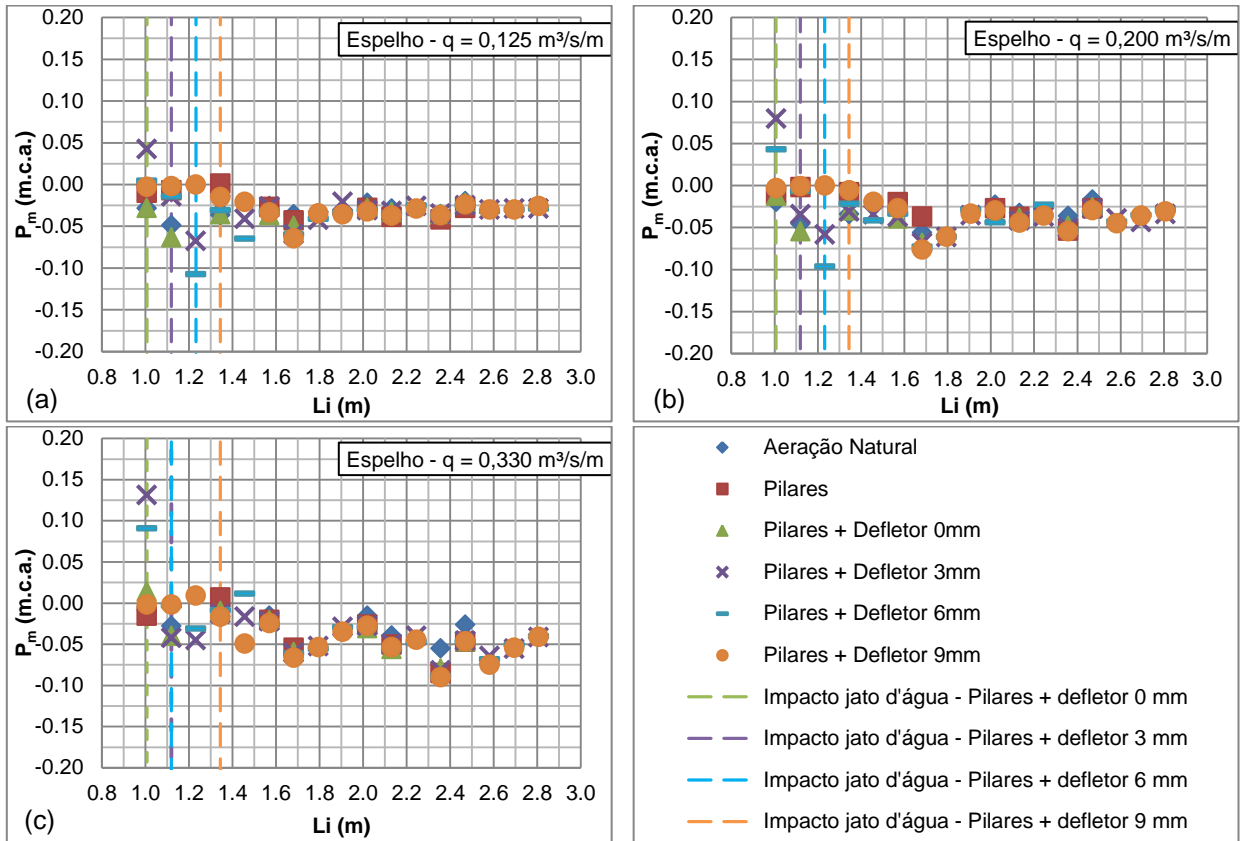


Figura 138 - Comportamento das pressões médias para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m<sup>3</sup>/s/m, (b) vazão específica 0,200 m<sup>3</sup>/s/m e (c) vazão específica 0,330 m<sup>3</sup>/s/m

### Apêndice 3 – Comportamento das pressões flutuantes dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

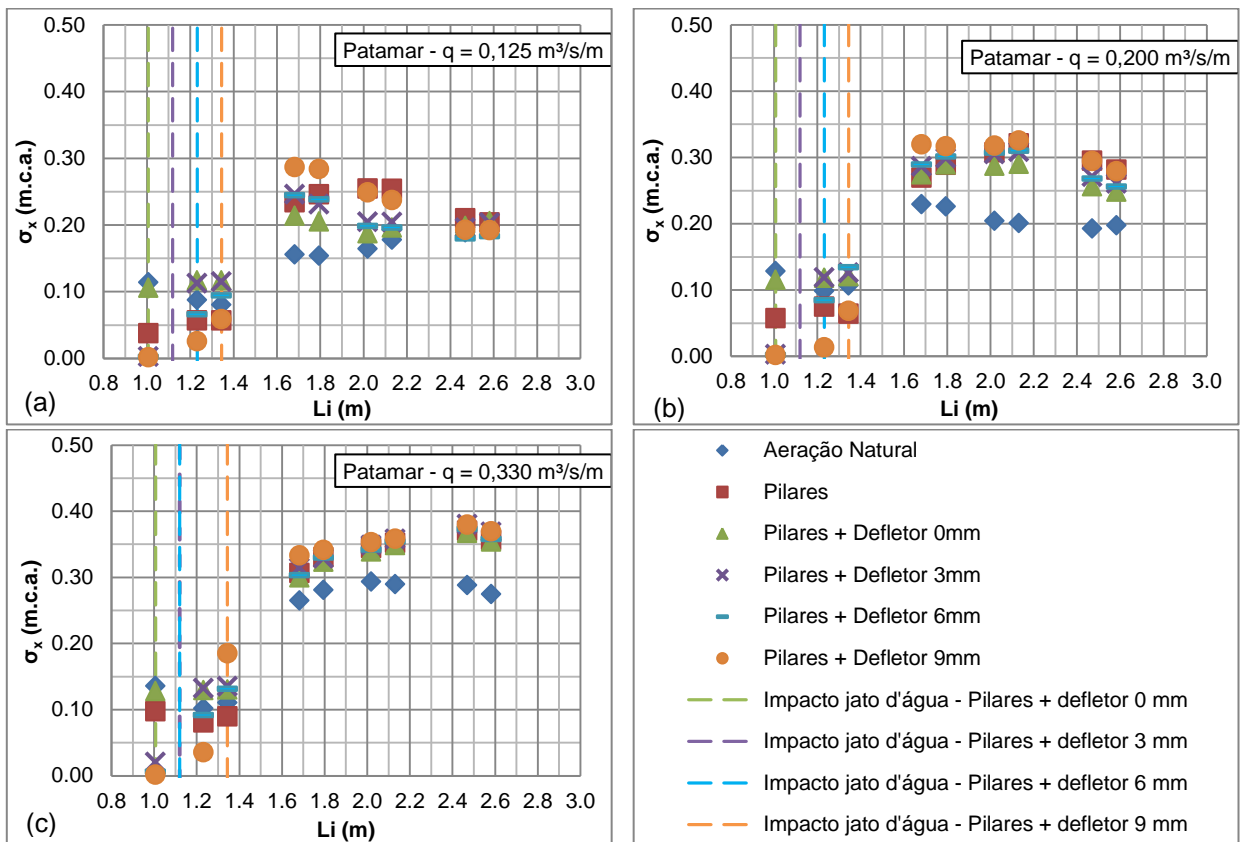


Figura 139 - Comportamento das pressões flutuantes para os patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$



**Apêndice 4 – Comportamento das pressões flutuantes dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

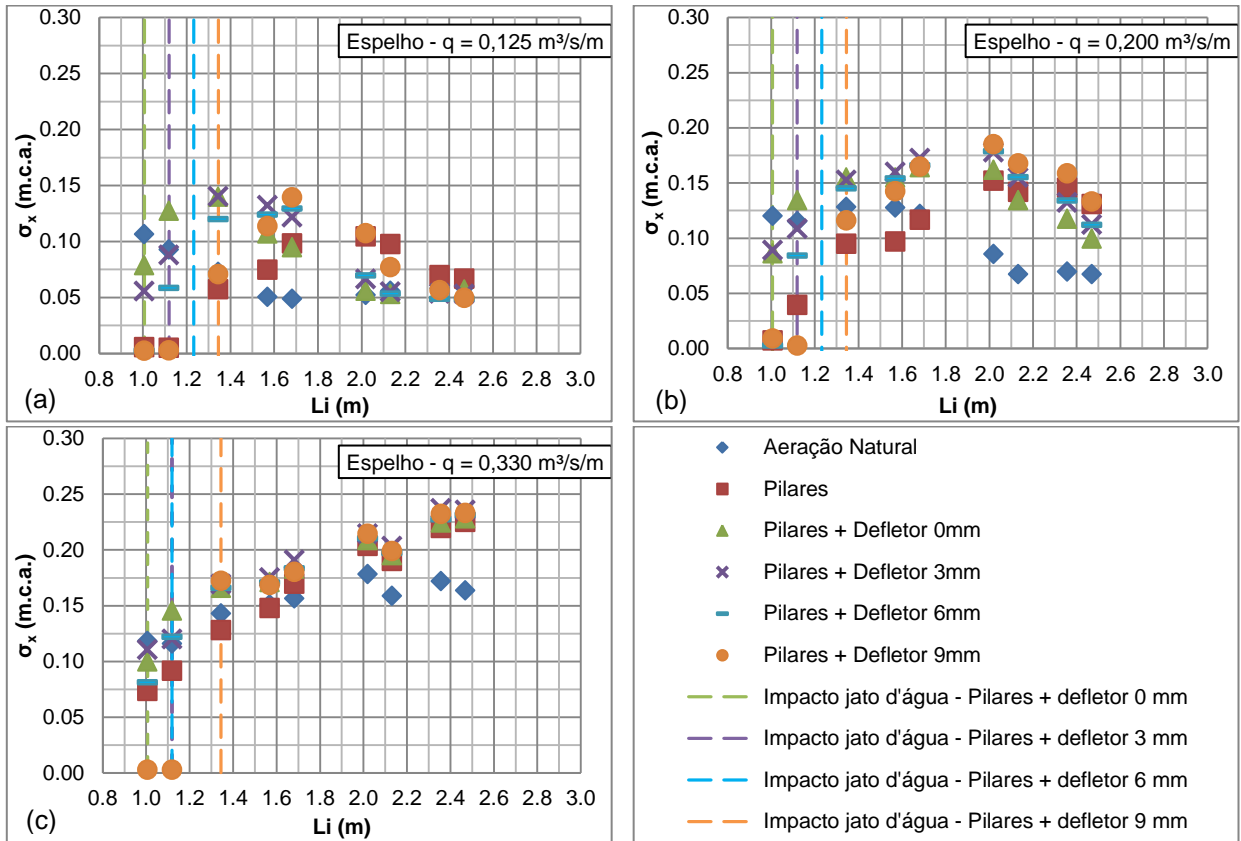


Figura 140 - Comportamento das pressões flutuantes para os espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m³/s/m, (b) vazão específica 0,200 m³/s/m e (c) vazão específica 0,330 m³/s/m

### Apêndice 5 – Comportamento das pressões extremas mínimas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro

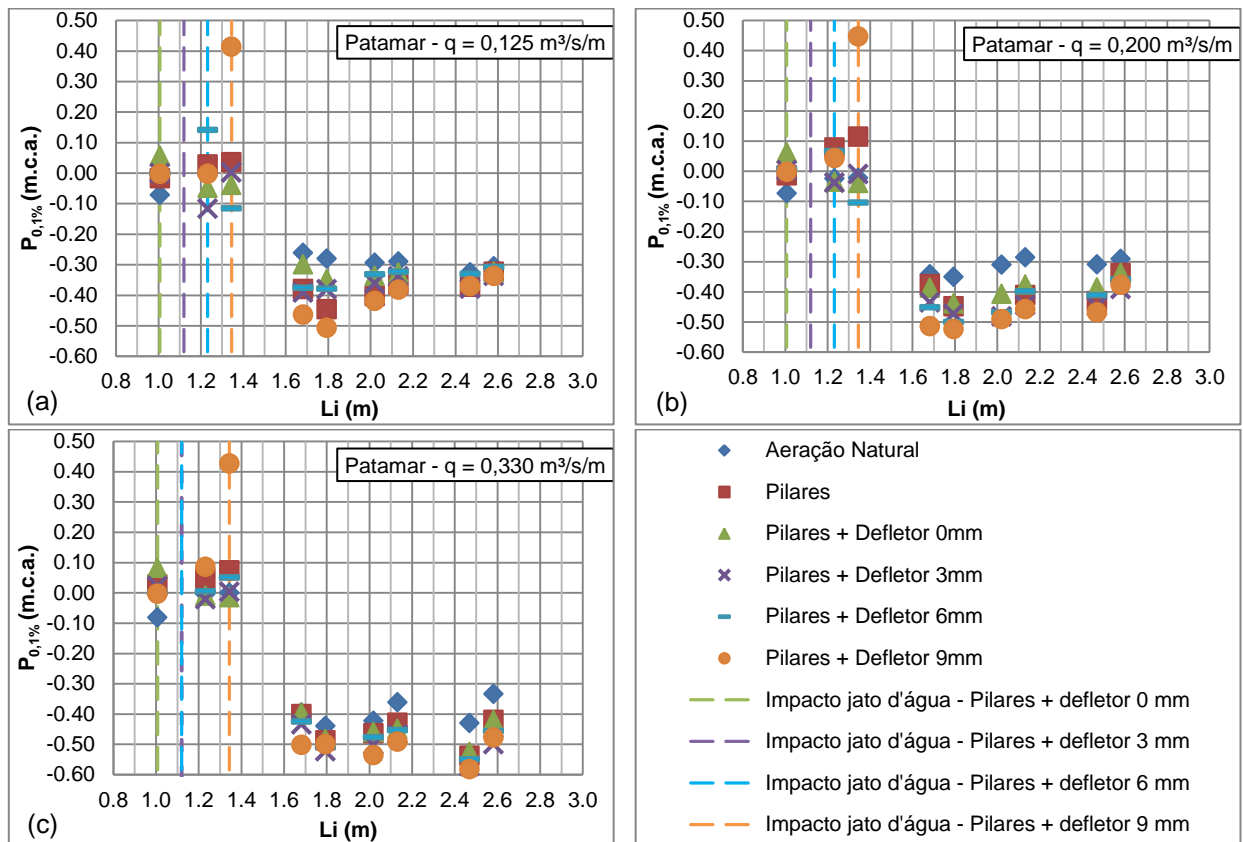


Figura 141 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

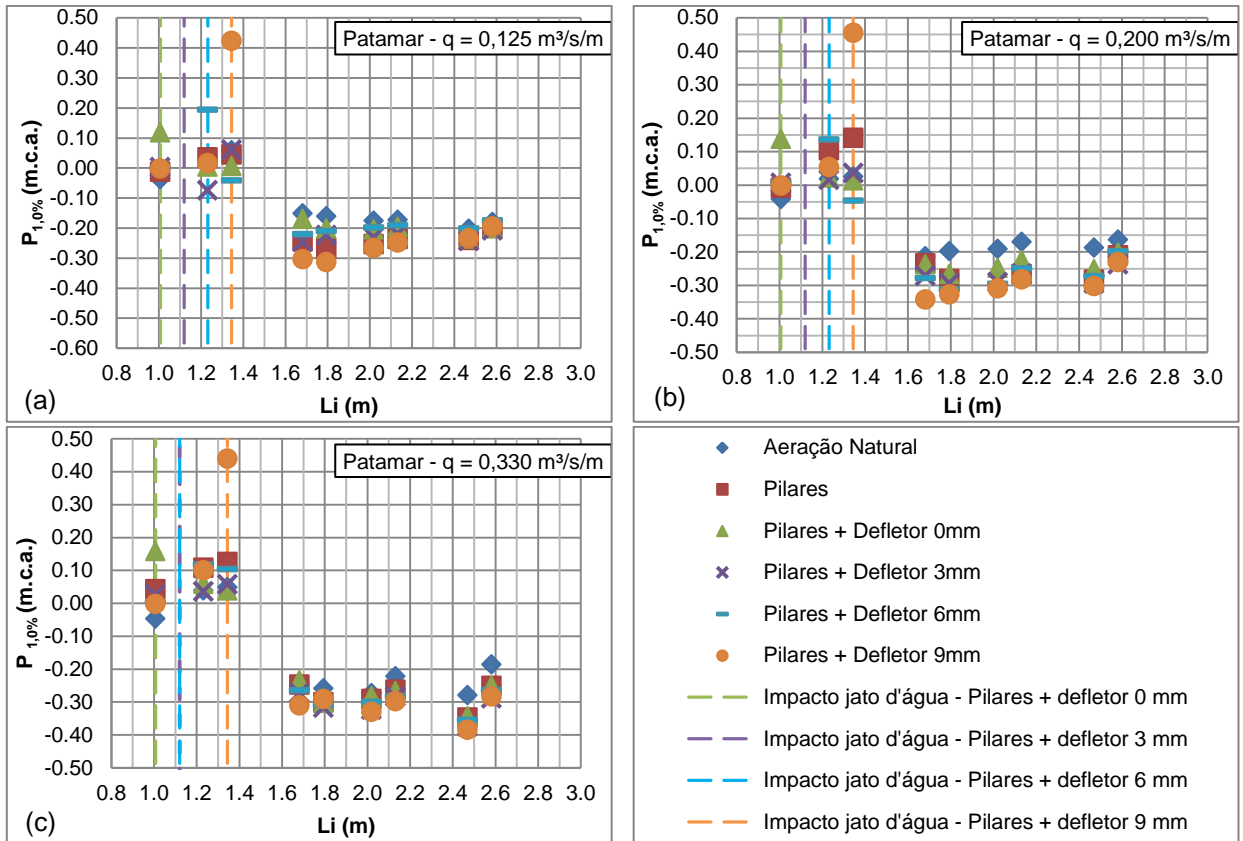


Figura 142 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s/m}$

**Apêndice 6 – Comportamento das pressões extremas mínimas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

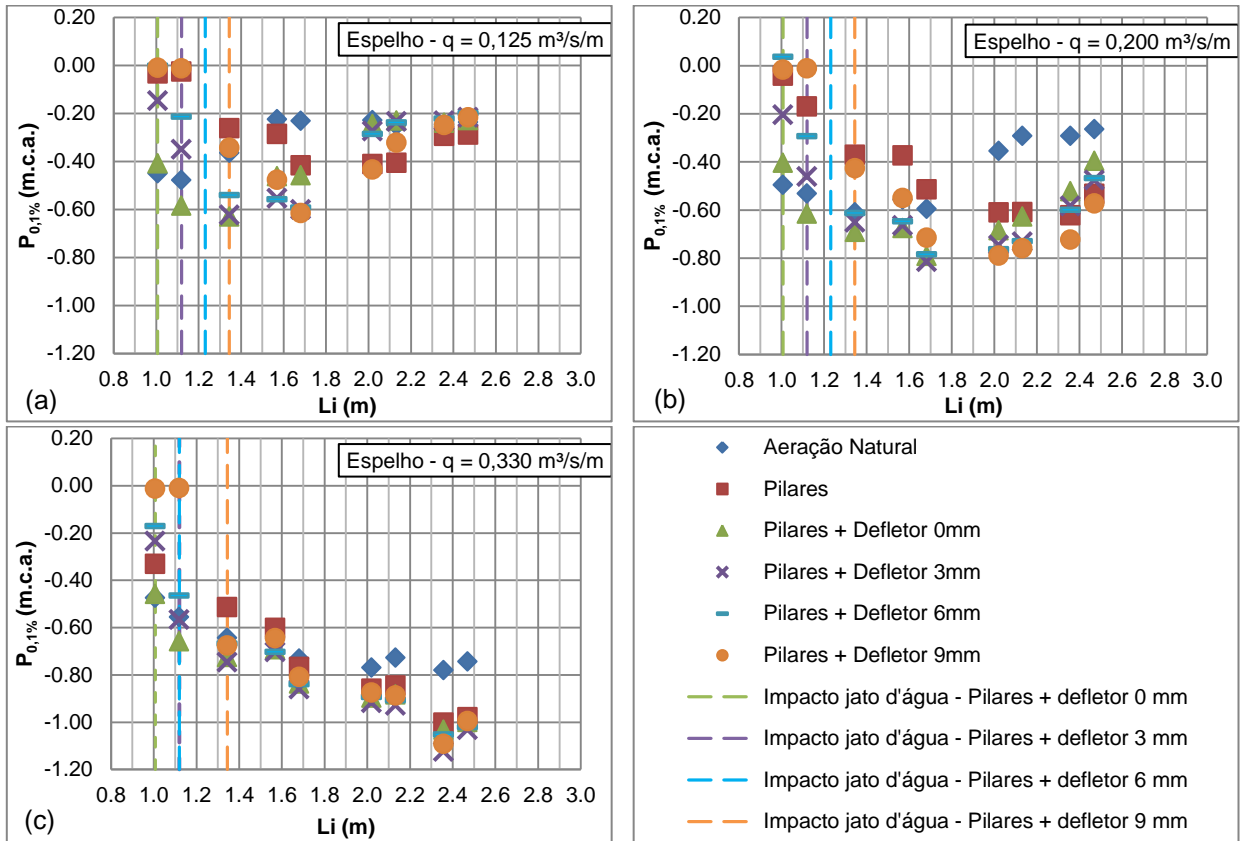


Figura 143 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 0,1% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

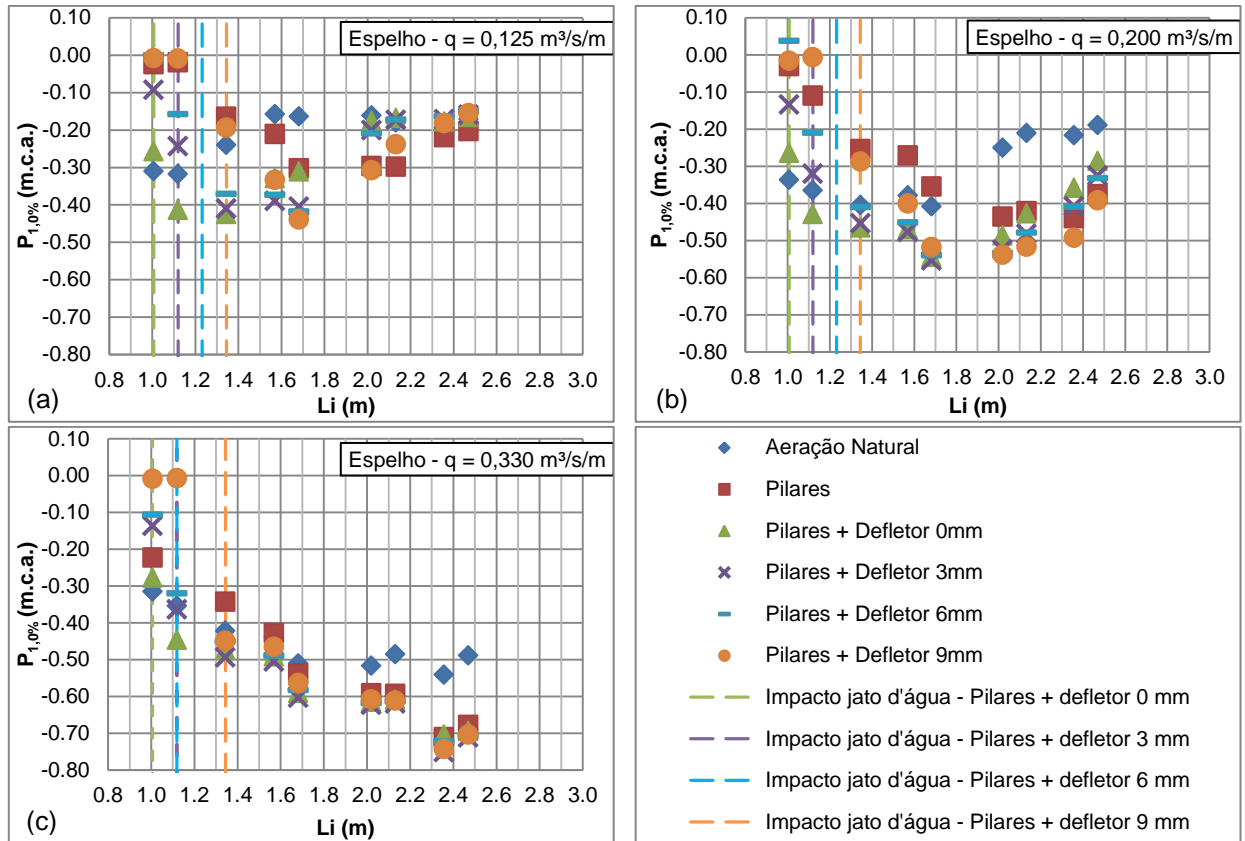


Figura 144 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 1,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

**Apêndice 7 – Comportamento das pressões extremas máximas dos patamares dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

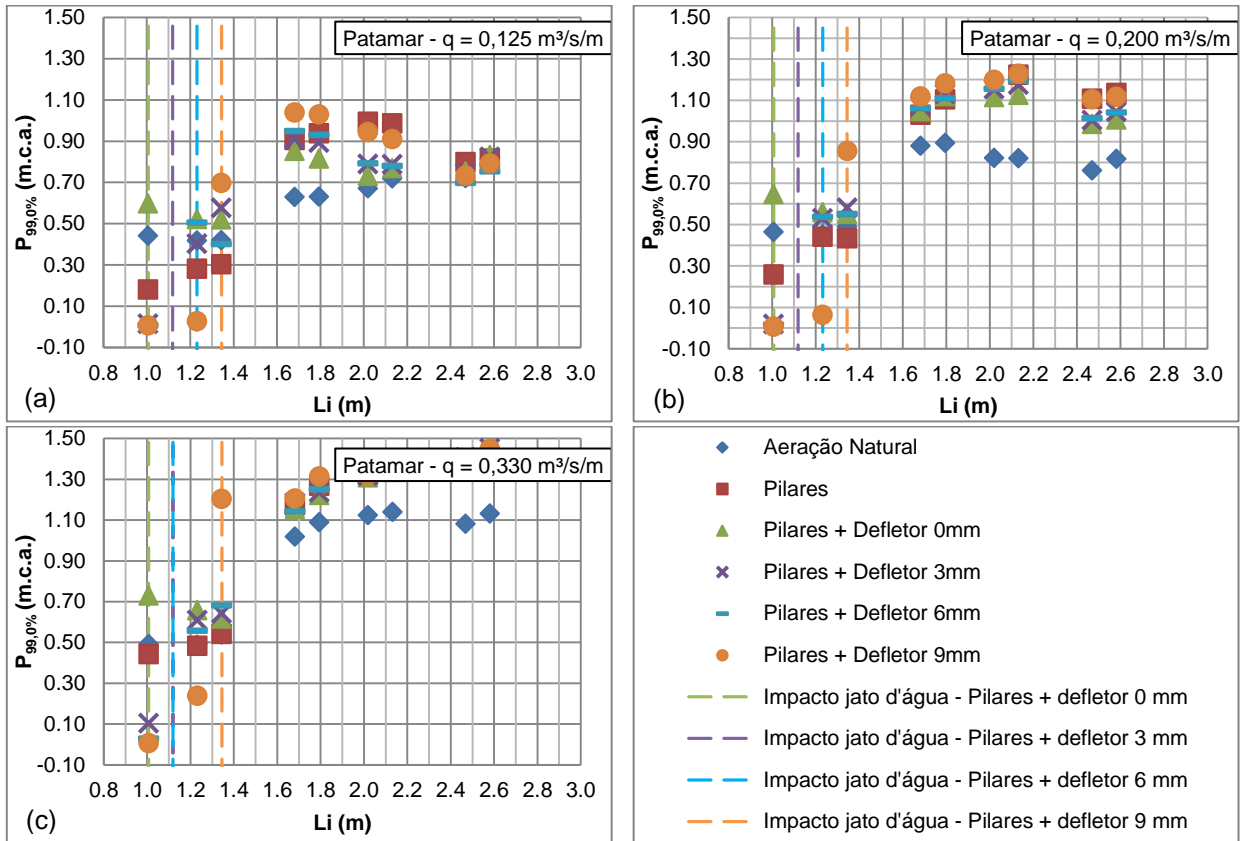


Figura 145 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$

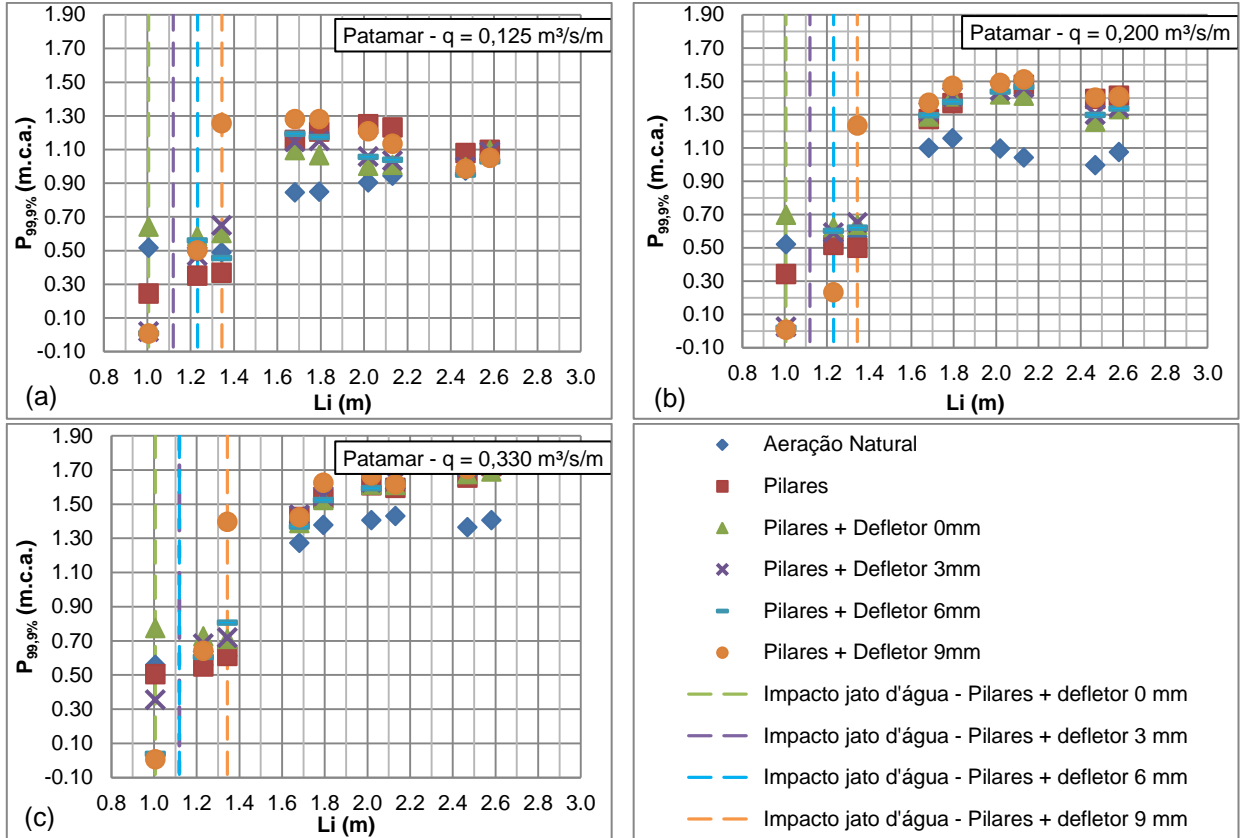


Figura 146 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos patamares dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s/m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s/m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s/m}$

**Apêndice 8 – Comportamento das pressões extremas máximas dos espelhos dos degraus ao longo da calha do vertedouro**

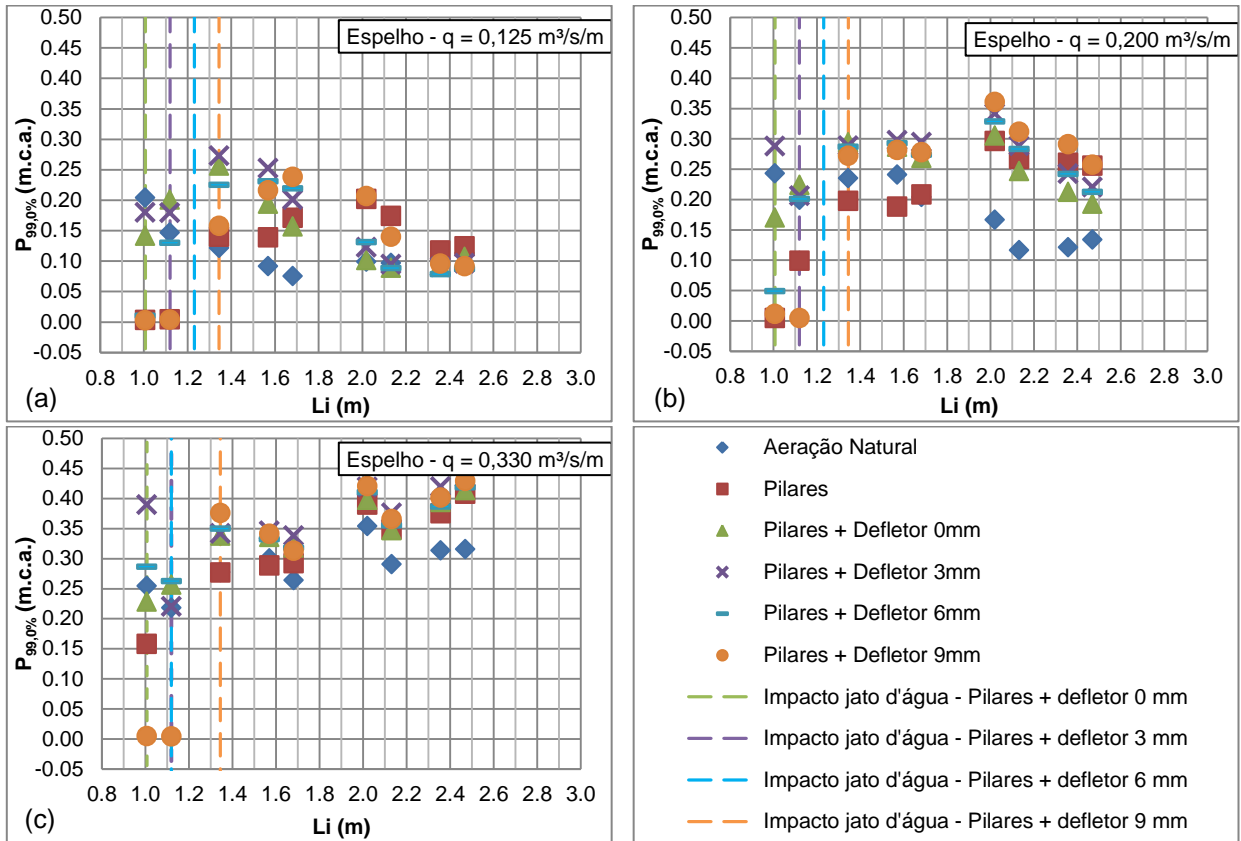


Figura 147 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,0% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica 0,125 m³/s/m, (b) vazão específica 0,200 m³/s/m e (c) vazão específica 0,330 m³/s/m



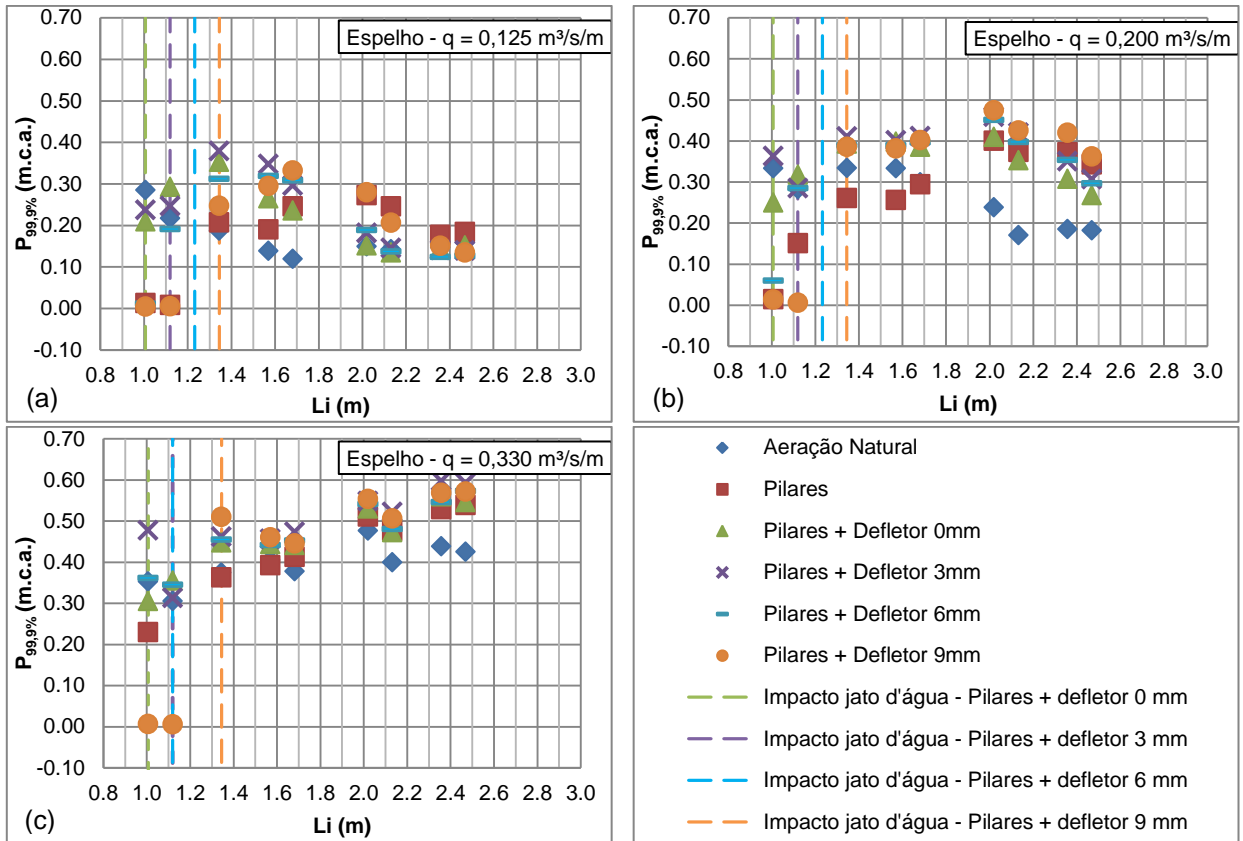


Figura 148 - Comportamento das pressões extremas associadas às probabilidades de não-excedência de 99,9% dos espelhos dos degraus para a aeração natural e aerações induzidas para (a) vazão específica  $0,125 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , (b) vazão específica  $0,200 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  e (c) vazão específica  $0,330 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$