

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**Augusto Ceron Reginatto**

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM VERTEDOURO EM  
DEGRAUS DE INCLINAÇÃO 1V : 0,75H COM AERAÇÃO INDUZIDA  
POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR**

Porto Alegre  
dezembro 2019

**AUGUSTO CERON REGINATTO**

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM VERTEDOURO  
EM DEGRAUS DE INCLINAÇÃO 1V : 0,75H COM AERAÇÃO  
INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

**Orientador: Maurício Dai Prá**

**Co-orientadora: Carolina Kuhn Novakoski**

Porto Alegre  
dezembro 2019

**AUGUSTO CERON REGINATTO**

**CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM VERTEDOURO  
EM DEGRAUS DE INCLINAÇÃO 1V : 0,75H COM AERAÇÃO  
INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR**

Porto Alegre, dezembro de 2019

Prof Maurício Dai Prá

Carolina Kuhn Novakoski

Dr. pela UFRGS

Me. pela UFRGS

Orientador

Co-orientadora

**BANCA EXAMINADORA**

**Rute Ferla**

Me. pela UFRGS

**Prof. Eder Daniel Teixeira**

Dr. pela UFRGS

**Prof. Maurício Dai Prá**

Dr. pela UFRGS

Dedico o presente trabalho, assim como todos os outros, à  
minha mãe Marilva, meu pai Oralando e minha irmã  
Carol. Obrigado por tudo!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha família, pelo apoio, incentivo e compreensão, especialmente todas as vezes em que abri mão de estar com eles, durante o período acadêmico.

Ao Professor Maurício, por orientar o presente trabalho, pela dedicação ao Laboratório de Obras Hidráulicas e pelas boas conversas de fim de tarde.

À Carolina, por coorientar o presente trabalho, por todas as dicas em formatação, pelas respostas rápidas e pelo empenho em me ajudar.

Aos colegas e professores do laboratório, em especial ao Guilherme, sempre dispostos a ajudar, pelo companheirismo e pelas boas conversas.

Ao Mathias, por seis anos de convivência diária, por muito aprendizado, pelas risadas e pelo apoio.

Aos amigos de infância, em especial ao Lucas, Pedro, João, Cristyan, Murillo, Marlon, Augusto, Vinícius, Fabrício, Thales e Giovanni, por todas as histórias vividas e pelas que ainda serão.

Aos amigos de graduação, em especial ao Murilo, Mateus, Bernardo, Fabrício e João, por todas as histórias vividas e pelas que ainda serão.

Confiante que com sua ajuda,  
a humanidade será o que nasceu para ser.  
Livre e Independente.

*John F. Kennedy*

## RESUMO

Em barragens de concreto, a utilização de vertedouros em degraus aumentou com o advento construtivo do concreto compactado a rolo (CCR), a partir dos anos 70. As estruturas, responsáveis por transpor o excesso de água do reservatório para jusante, são capazes de dissipar grande parte da energia do escoamento, reduzindo custos com dissipadores. O concreto sofre com cavitação e erosão na região da calha, principalmente onde o escoamento não está aerado. A entrada de ar no escoamento permite que a mistura água-ar se torne mais compressível, absorvendo os impactos gerados pela implosão de bolhas de cavitação. Vertedouros de calha lisa utilizam sistemas aeradores para aumentar a concentração de ar no escoamento junto ao fundo. Sistemas aeradores em vertedouros em degraus são pouco utilizados atualmente, devido à ausência de informações sobre seus efeitos no escoamento. A ausência de informação sobre vertedouros em degraus com sistemas aeradores dificulta a elaboração de projetos e, por consequência, a concepção destas obras. O presente trabalho caracteriza o escoamento sobre a calha de vertedouro em degraus com aeração induzida por defletor e câmara de ar, separando-o em regiões ao longo da calha, e relaciona pressões médias com as regiões onde atuam. Através da análise de dados é possível determinar regiões do escoamento de acordo com a distribuição de pressões ao longo da calha. A sequência das regiões estudadas em modelo físico, instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS permanece sempre a mesma, independentemente das vazões ensaiadas e da quantidade de ar inserida pelo sistema. Diferentes condições de entrada de ar demonstram variação localizações de algumas regiões analisadas, mantendo suas características. Maiores vazões deslocam para jusante a ocorrência dos fenômenos analisados e intensificam os valores de pressão média na calha. O presente trabalho serve como base para futuras análises de pressões instantâneas e flutuações de pressão ao longo da calha, em modelos e protótipos com aeração induzida por vertedouro em degraus.

Palavras-chave: Vertedouro em degraus. Sistema aerador. Aeração induzida. Pressões nos degraus. Cavitação.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Barragem na Akarnanian, Grécia (1300 A. C.).....	22
Figura 2 – Barragem de New Croton, Estados Unidos (1906).....	22
Figura 3 – escoamento com interferência esteira-degrau – Recirculação instável. ....	25
Figura 4 – escoamento com interferência esteira-esteira – Recirculação instável.....	26
Figura 5 – escoamento com recirculação estável.....	26
Figura 6 – Regiões do escoamento em função da aeração. ....	27
Figura 7 - Parâmetros do escoamento.....	28
Figura 8 - Características geométricas dos degraus.....	29
Figura 9- Adimensionalização para o ponto de início de aeração do escoamento conforme diversos autores. ....	31
Figura 10 – Adimensionalização para alturas do escoamento no ponto de início de aeração conforme diversos autores. ....	31
Figura 11 – Localização de patamar e espelho dos degraus.....	32
Figura 12 - Coeficiente de pressão média nos espelhos ( $C_{pm}$ ). ....	34
Figura 13 – Coeficientes de pressões extremas nos espelhos ( $C_{p\alpha}$ ). ....	35
Figura 14 - Coeficiente de pressão média nos patamares ( $C_{pm}$ ). ....	35
Figura 15 - Coeficientes de pressões extremas nos patamar ( $C_{p\alpha}$ ). ....	36
Figura 16 – Posição adimensional das tomadas de pressão utilizadas por Gomes.....	36
Figura 17 – Pressões médias adimensionalizadas com relação á energia cinética do escoamento. ....	37
Figura 18 - Influência da aeração na mitigação de erosão do concreto exposto a escoamentos de velocidade média igual a 46 m/s.....	39
Figura 19 – Principais dispositivos aeradores e suas combinações.....	41
Figura 20 - Sistema aerador (defletor + degrau) e chaminé de abastecimento de ar.....	42
Figura 21 – (a) ilustração do escoamento e (b) concentração de ar junto ao fundo em relação à distância da crista.....	43
Figura 22 – Concentração de ar no escoamento entre 0% e 7%, com aerador de fundo desenvolvido e estudado por Arantes (2007) ....	45
Figura 23 – Layout da tubulação de abastecimento e do modelo físico.....	49
Figura 24 – Medidores de vazão ....	50

Figura 25 – Modelo físico em estrutura metálica instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS .....	51
Figura 26 – Disposição dos reservatórios de estabilização no modelo .....	52
Figura 27 – Estruturas internas dos reservatórios.....	53
Figura 28 – Calha escalonada.....	54
Figura 29 - Ilustração para referência dos parâmetros do modelo físico instalado .....	55
Figura 30 – Detalhe da geometria do defletor .....	56
Figura 31 – Localização do defletor na calha.....	57
Figura 32 – Câmara de ar instalada abaixo da ogiva, sem tubulação .....	58
Figura 33 – Localização da câmara de ar em relação ao modelo .....	58
Figura 34 - Sistema soprador de ar .....	59
Figura 35 - Sistema de aquisição de dados.....	61
Figura 36 – a) Detalhe da caixa acrílica e b) conjunto caixa-tubo de vidro .....	62
Figura 37 – Disposição dos transdutores na calha do vertedouro .....	64
Figura 38 – Parâmetros da equação do princípio de conservação da energia .....	67
Figura 39 - escoamento sobre ogiva para vazão de 150 l/s.....	69
Figura 40 – Jato formado pelo descolamento do escoamento com a calha, para vazão de 150 l/s. ....	70
Figura 41 – Região de impacto do jato e desenvolvimento da aeração inferior, para vazão de 150 l/s .....	71
Figura 42 – Zona de transição na vazão de 150 l/s: (a) vista frontal do escoamento e (b) vista inclinada. ....	72
Figura 43 – Demonstração da região de escoamento uniforme para vazão de 150 l/s.....	73
Figura 44 – Separação entre regiões 2 e 3, para cada vazão e cada condição de entrada de ar	75
Figura 45 - Separação entre regiões 3 e 4, para cada vazão e cada condição de entrada de ar	76
Figura 46 - Separação entre regiões 4 e 5, para cada vazão e cada condição de entrada de ar	77
Figura 47 – Gráfico adimensional do impacto do jato .....	78
Figura 48 – Gráfico adimensional do encontro entre aerações .....	78
Figura 49 – Pressões médias nos patamares com aeração induzida $\beta$ 10% para diversas vazões .....	80
Figura 50 – Pressões médias nos espelhos com aeração induzida $\beta$ 10% para diversas vazões .....	81

Figura 51 - Pressões médias nos patamares para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	82
Figura 52 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	83
Figura 53 – Valores de desvio padrão no patamar com aeração induzida $\beta$ 10% para diversas vazões .....	84
Figura 54 – Valores de desvio padrão no espelho com aeração induzida $\beta$ 10% para diversas vazões .....	85
Figura 55 - Valores de desvio padrão no patamar para vazão de 150 l/s e diversas condições de entrada de ar.....	86
Figura 56 - Valores de desvio padrão no espelho para vazão de 150 l/s e diversas condições de entrada de ar.....	87
Figura 57 – Pressões médias de 75 e 200 l/s para $\beta$ 10% ensaio sem soprador com separação das regiões 2, 3, 4 e 5 no patamar.....	88
Figura 58 – Pressões médias de 75 e 200 l/s para $\beta$ 10% ensaio sem soprador com separação das regiões 2, 3, 4 e 5 no espelho .....	89
Figura 59 - Pressões médias nos patamares para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	94
Figura 60 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	94
Figura 61- Pressões médias nos patamares para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	94
Figura 62 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	95
Figura 63 - Pressões médias nos patamares para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	95
Figura 64 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	96
Figura 65 - Pressões médias nos patamares para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	96
Figura 66 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	97
Figura 67 - Pressões médias nos patamares para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	97

Figura 68 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	98
Figura 69 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	98
Figura 70 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	99
Figura 71 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	99
Figura 72 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	100
Figura 73 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	100
Figura 74 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	101
Figura 75 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	101
Figura 76 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	102
Figura 77 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	102
Figura 78 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar.....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Equações sugeridas por diversos autores para posições de início de aeração e profundidade do escoamento nessa posição. ....	30
Tabela 2 – Equações propostas por Pfister et al. (2006) relacionando concentrações de ar e distância da crista.....	44
Tabela 3 – Dados do modelo utilizados por Novakoski et al. (2019) .....	46
Tabela 4 – Coeficientes utilizados na Equação 23, de acordo com a posição de referência. ....	47
Tabela 5 – Informações relacionadas aos medidores de vazão utilizados.....	50
Tabela 6 – Resumo de parâmetros do modelo físico instalado .....	55
Tabela 7 – localização dos transdutores ao longo da calha .....	63
Tabela 8 – Combinação de vazão de água e coeficiente $\beta$ ensaiados.....	65
Tabela 9 – Degrau de separação de regiões de acordo com as condições de ensaio.....	74

## **LISTA DE SIGLAS**

IAHR = International Association for Hydro-Environment Engineering and Research.

IPH = Instituto de Pesquisas Hidráulicas;

LAHE = Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos

LOH = Laboratório de Obras Hidráulicas;

UFRGS = Universidade Federal do Rio Grande do Sul;

## LISTA DE SÍMBOLOS

$B$  = largura da calha do vertedouro (m);

$C_b, C_{bm}, C_{bu}$  = concentração de ar junto ao fundo, concentração média de ar junto ao fundo, concentração uniforme de ar junto ao fundo (adimensional);

$C_m$  = concentração média de ar (adimensional);

$C_p, C_{pm}, C_{p\alpha}$  = coeficiente de pressão, coeficiente de pressão média, coeficiente de pressão extrema (adimensional);

$d_c$  = altura crítica do escoamento (m);

$F^*$  = número de Froude do degrau (adimensional);

$Fr$  = número de Froude (adimensional)

$g$  = aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );

$H_1$  e  $H_0$  = energia total na crista e no fim da ogiva, respectivamente (m);

$h$  = altura do degrau (m);

$h_c$  = altura da lâmina d'água na crista da ogiva (m);

$h_a$  = altura da lâmina d'água no ponto de aeração (m);

$h_0$  = altura do escoamento no fim da ogiva (m);

$h_v$  = altura vertical do escoamento no fim da ogiva (m);

$H_d$  = carga de projeto (m);

$k$  = altura de rugosidade (m);

$l$  = largura do degrau (m);

$L$  = posição ao longo da calha a partir do fim da ogiva (m);

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

$L_{a1}$  = comprimento do início de aeração a partir do início da ogiva (m);

$L_{a2}$  = comprimento do início de aeração a partir da crista da ogiva (m);

$L_i$  = distância entre a crista da ogiva e a quina do primeiro degrau da calha (m);

$n$  = número de degraus (adimensional);

$P$  = pressão (m.c.a.);

$Q_1$  e  $Q_0$  = vazão na crista e no fim da ogiva, respectivamente ( $m^3/s$ );

$Q_{\text{água}}$  = vazão de água (l/s);

$Q_{\text{ar}}$  = vazão de ar (l/s);

$q$  = vazão específica ( $m^3/s/m$ );

$s'$  = posição longitudinal (adimensional);

$V_m$  = velocidade média do fluxo (m/s);

$V_0$  = velocidade média no fim da ogiva (m/s);

$Z$  = distância vertical da crista até o degrau analisado (m);

$Z_A, Z_B, Z_C, Z_D, Z_E, Z_F$  = coordenada vertical da região A, B, C, D, E, F (m);

$Z_2$  e  $Z_3$  = coordenada vertical da região 2 e 3 (m);

$z_0$  = altura do fim da ogiva em relação a um referencial (m);

$\alpha$  = ângulo de inclinação da calha com a horizontal ( $^\circ$ );

$\beta$  = coeficiente de entrada de ar (adimensional);

$\theta$  = inclinação entre o defletor e a calha ( $^\circ$ );

$\delta$  = espessura da camada limite em qualquer ponto do escoamento (m);

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	DIRETRIZES DA PESQUISA .....	19
2.1	QUESTÃO DE PESQUISA .....	19
2.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	19
2.2.1	OBJETIVO PRINCIPAL .....	19
2.2.2	OBJETIVOS SECUNDÁRIOS.....	19
2.3	JUSTIFICATIVA .....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1	HISTÓRICO.....	21
3.2	ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOURO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL.....	23
3.2.1	TIPOS DE ESCOAMENTO .....	23
3.2.1.1	ESCOAMENTO EM QUEDAS SUCESSIVAS (NAPPE FLOW).....	24
3.2.1.2	ESCOAMENTO EM TRANSIÇÃO (TRANSITION FLOW).....	24
3.2.1.3	ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES (SKIMMING FLOW) 24	
3.2.1.3.1	ESCOAMENTO COM INTERFERÊNCIA ESTEIRA-DEGRAU – RECIRCULAÇÃO INSTÁVEL .....	25
3.2.1.3.2	ESCOAMENTO COM INTERFERÊNCIA ESTEIRA-ESTEIRA – RECIRCULAÇÃO INSTÁVEL .....	26
3.2.1.3.3	ESCOAMENTO COM RECIRCULAÇÃO ESTÁVEL .....	26
3.2.2	PARÂMETROS DA AERAÇÃO NATURAL .....	27
3.2.3	PRESSÕES.....	32
3.3	CAVITAÇÃO.....	38

3.4	ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA POR AERADOR .....	40
3.4.1	CONDIÇÕES DE ENTRADA DE AR .....	47
4	METODOLOGIA.....	49
4.1	INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL.....	49
4.1.1	DESCRIÇÃO DO MODELO.....	51
4.1.1.1	O RESERVATÓRIO.....	51
4.1.1.2	CANAL VERTEDOIRO.....	53
4.1.2	ESTRUTURAS AERADORAS.....	56
4.1.2.1	DEFLETOR .....	56
4.1.2.2	CÂMARA DE AR .....	57
4.1.3	AQUISIÇÃO DE DADOS .....	60
4.2	CONDIÇÕES DE ENSAIO .....	62
4.3	METODOLOGIA ANALÍTICA.....	65
5	RESULTADOS DA PESQUISA .....	68
5.1	RESULTADOS QUALITATIVOS.....	68
5.1.1	ESCOAMENTO SOBRE OGIVA E DEFLETOR .....	69
5.1.2	O JATO .....	70
5.1.3	IMPACTO DO JATO E DESENVOLVIMENTO DA AERAÇÃO INFERIOR	71
5.1.4	ZONA DE TRANSIÇÃO .....	72
5.1.5	ESCOAMENTO UNIFORME.....	73
5.2	RESULTADOS QUANTITATIVOS.....	73
5.2.1	DEGRAU DE SEPARAÇÃO DAS REGIÕES.....	73
5.2.2	PRESSÕES.....	79

6	CONCLUSÃO.....	90
6.1	CONCLUSÕES QUANTO ÀS REGIÕES DETERMINADAS .....	90
6.2	CONCLUSÕES QUANTO ÀS PRESSÕES AO LONGO DA CALHA .....	91
7	BIBLIOGRAFIA .....	92
	APÊNDICE .....	94



## 1 INTRODUÇÃO

O intuito de construir vertedouros em barragens é extravasar com segurança o excesso de água do reservatório. A energia cinética do escoamento na calha, caso não controlada, pode gerar erosão nas margens dos rios. As macrorugosidades geradas pelos degraus permitem que um vertedouro em degraus dissipe grande parte da energia do escoamento ao longo da calha, possibilitando a construção de sistemas dissipadores de menor dimensão a jusante do vertedouro. A partir do desenvolvimento da técnica de concreto compactado a rolo, a execução de vertedouros em degraus é viável técnica e economicamente.

Alguns canais escalonados utilizados na antiguidade tinham como objetivo reduzir a velocidade do escoamento. Entretanto, apenas a partir da década de 70, com o aumento dos projetos e obras de vertedouros em degraus, as pesquisas sobre o dimensionamento desses vertedouros foram fomentadas, principalmente com a utilização de modelos físicos.

O dimensionamento de vertedouros em degraus foi estudado por Tozzi (1992), Chanson (1994), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), dentre outros autores, analisando tipos de escoamento, ponto de início de aeração, dissipação de energia e pressões extremas, em função de características como inclinação da calha, tamanho dos degraus e vazão extravasada. Fica evidenciado pelos estudos citados que a dissipação de energia em vertedouros em degraus varia em torno de 20% a 90%, dependendo das características da calha e da vazão.

Estudos mais recentes, exemplificados por Pfister et al. (2006), com enfoque na concentração de ar, e Conterato (2011), com enfoque nas pressões, dentre outros autores, abordam a proteção dos degraus. As pressões atuantes podem possibilitar fenômenos como erosão e cavitação, capazes de danificar as quinas dos degraus. A entrada de ar no escoamento, aumentando a compressibilidade da mistura água-ar, possibilita a absorção dos impactos gerados pela implosão de bolhas de cavitação, protegendo a estrutura.

Vertedouros projetados para maiores vazões específicas são estruturas capazes de extravasar maiores vazões, para uma mesma largura de vertedouro. O aumento da vazão específica gera esforços mais intensos sobre a calha, aumentando as ocorrências de cavitação e erosão. Aerar o escoamento é uma possível solução, estudada por Peterka (1953) para

diversas estruturas hidráulicas, já aplicada em vertedouros de calha lisa, estudados por Volkart e Rutschmann (1984) dentre outros autores.

O presente trabalho estuda o efeito da instalação de estruturas aeradoras, como defletores, em modelo físico de vertedouro em degraus com inclinação de  $1V : 0,75H$ , degraus com altura de 6 cm. O escoamento será dividido qualitativamente de acordo com suas características, em diferentes regiões da calha. As pressões médias e desvios padrão, adquiridas por transdutores em ensaios em modelo físico, serão analisadas, variando a vazão vertente sobre a calha e a relação  $Q_{\text{água}}/Q_{\text{ar}}$ , representada pelo coeficiente  $\beta$ .

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa do trabalho é: quais as características do escoamento sobre a calha de um vertedouro em degraus com aeração induzida por defletor e câmara de ar, para diferentes valores de coeficiente de entrada de ar?

### **2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA**

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

#### **2.2.1 OBJETIVO PRINCIPAL**

O objetivo principal do trabalho é caracterizar o escoamento na calha de um vertedouro em degraus com aeração induzida por defletor e câmara de ar para diferentes valores de coeficiente de entrada de ar.

#### **2.2.2 OBJETIVOS SECUNDÁRIOS**

Realizar análise visual, qualitativa e quantitativa, das regiões do escoamento, analisar dados adquiridos na calha do modelo físico existente no LOH-IPH/UFRGS, determinar pressões médias e desvios padrão, facilitando futuras análises de pressões instantâneas vinculadas a potenciais eventos de cavitação e erosão.

## 2.3 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho assume que a entrada de ar no escoamento protege os degraus dos danos gerados por cavitação e erosão. Antecipar a entrada de ar no escoamento em vertedouros em degraus, utilizando técnicas de eficiência quantificada e comprovada em vertedouros de calha lisa, é uma alternativa razoável.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

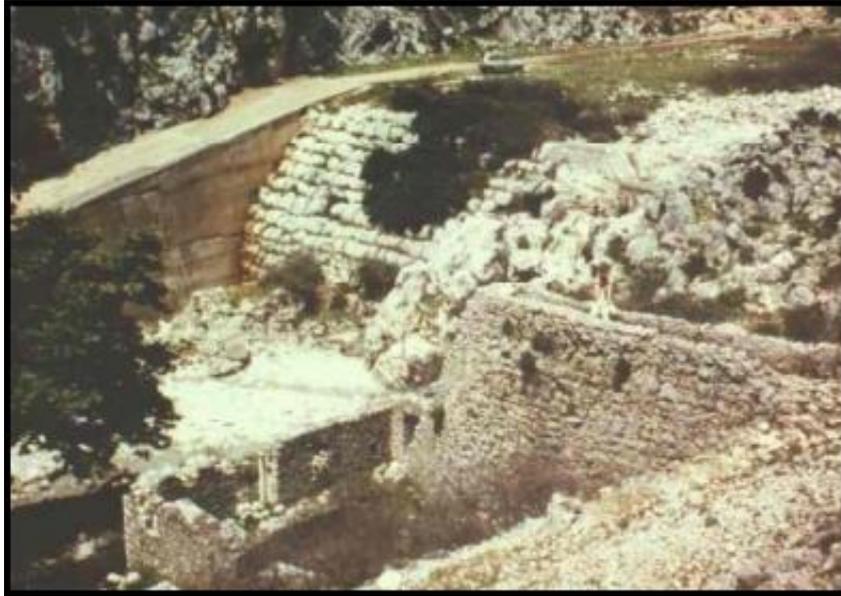
#### 3.1 HISTÓRICO

Todos os reservatórios construídos pelo homem precisam de um sistema para extravasar o excesso de água. No caso de barragens, o sistema extravasor é chamado de vertedouro, fundamental para a segurança da estrutura, direcionando a água de forma a não prejudicar o maciço e manter a integridade das margens dos rios.

A quantidade de energia do escoamento no pé da barragem é parâmetro fundamental para assegurar os objetivos do vertedouro. Conforme exposto por Tozzi (1992), corroborado por Sanagiotto (2003), a utilização de degraus na calha do vertedouro resulta em dissipação de energia relativa entre 20 e 90%, para determinadas relações de vazão específica e dimensões dos degraus, em um vertedouro de declividade do paramento de jusante de  $1V : 0,75H$ .

O primeiro vertedouro em degraus registrado pertence a uma barragem na Grécia, construída por volta de 1300 A.C. , apresentado na Figura 1, segundo diversos autores, dentre eles, Dai Prá (2004). O objetivo dos degraus, entretanto, no dado período histórico, era adquirir facilidade construtiva e estabilidade do maciço através da sobreposição das rochas. Apenas com a utilização de degraus em canais de irrigação, com o objetivo de reduzir a velocidade do fluxo de água, os degraus foram abordados de forma dissipativa nas estruturas. Chanson (1995), julga que a primeira barragem a possuir um vertedouro em degraus com objetivo de dissipar a energia do escoamento passante pela calha é New Croton, construída em 1906, ilustrada na Figura 2.

Figura 1 – Barragem na Akarnanian, Grécia (1300 A. C.).



Fonte: The University of Queensland<sup>1</sup> (2004, apud Dai Prá 2004)

Figura 2 – Barragem de New Croton, Estados Unidos (1906).



Fonte: The University of Queensland (2004, apud Dai Prá 2004)

---

<sup>1</sup> The University of Queensland, Brisbane, Austrália, 1999-2003. Contém informações sobre ensino, pesquisa e outras atividades realizadas pelo Dr. Hubert Chanson. Disponível em <http://www.uq.edu.au/~e2hehans/>.

Com o desenvolvimento da técnica construtiva de concreto compactado a rolo (CCR), a opção de vertedouro em degraus em barragens de concreto passou a ser mais viável economicamente, devido à baixa utilização de cimento no CCR e à facilidade de execução, em comparação com outras técnicas construtivas. Tozzi (1992) cita a tendência de que um grande número de vertedouros em degraus seja projetado e construído no Brasil a partir do desenvolvimento dessa técnica. A partir da realização de tais projetos e construções, Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Gomes (2006), Simões (2008), Conterato (2011), Conterato (2014) e Novakoski (2016), justificam seus estudos envolvendo variadas abordagens sobre o assunto. O mesmo ocorre com o presente trabalho.

## 3.2 ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL

O escoamento sobre vertedouro em degraus possui deferentes características, dependendo da vazão específica, inclinação da calha e dimensão do degrau. Aeração natural é denominada a entrada de ar no sistema sem auxílio de estruturas aeradoras. Essas características são divididas em três tipos de escoamento.

### 3.2.1 TIPOS DE ESCOAMENTO

Ao longo da calha, o escoamento sobre um vertedouro em degraus apresenta três classificações, segundo Chanson (1994), corroborado por Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004) e Conterato (2011):

- em quedas sucessivas (nappe flow);
- de transição (transition flow);
- deslizante sobre turbilhões (skimming flow);

As características das três classificações são distintas, principalmente quanto à forma de dissipação de energia ao longo da calha e serão resumidas a seguir.

### 3.2.1.1 ESCOAMENTO EM QUEDAS SUCESSIVAS (NAPPE FLOW)

Relacionando com as outras classificações, o escoamento em quedas sucessivas ocorre em calhas de declividade atenuada, vertendo menores vazões.

Durante um escoamento de quedas sucessivas, o fluxo forma um jato, originado na quina do degrau e impactando no degrau imediatamente a jusante. O impacto do jato pode ser total ou parcial sobre o degrau subsequente, de acordo com as características da calha e vazão específica do escoamento.

Nos casos em que o jato impacta totalmente sobre o degrau imediatamente a jusante, é possível que ocorra a formação de um ressalto hidráulico no patamar do degrau, antes da formação do jato seguinte, sendo responsável por parte da dissipação da energia.

Nos eventos sem formação de ressalto, o impacto do jato e sua dispersão no ar, são responsáveis pela dissipação de energia ao longo da calha.

### 3.2.1.2 ESCOAMENTO EM TRANSIÇÃO (TRANSITION FLOW)

O escoamento em transição ocorre em situações intermediárias de declividade da calha e vazão vertente. Maiores vazões e maiores declividades, comparadas com o escoamento em quedas sucessivas; menores vazões e menores declividades, comparadas com o escoamento deslizante sobre turbilhões. Gomes (2006) e Dai Prá (2004) abordam mais detalhadamente esse tipo de escoamento, devido à sua instabilidade.

### 3.2.1.3 ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES (SKIMMING FLOW)

O escoamento sobre turbilhões ocorre sobre calhas com maior declividade, vertendo maiores vazões. Os turbilhões, localizados entre o espelho e o patamar de cada degrau, são recirculações do escoamento, formando um pseudo fundo. A região de pseudo fundo é delimitada pela linha tangente às quinas dos degraus, sobre a qual passa o fluxo principal do escoamento. Na interação do pseudo fundo com o escoamento principal ocorre uma transferência de quantidade de movimento, mantendo a circulação dos turbilhões. Essa interação é a principal responsável pela dissipação de energia cinética do escoamento, segundo Dai Prá (2004).

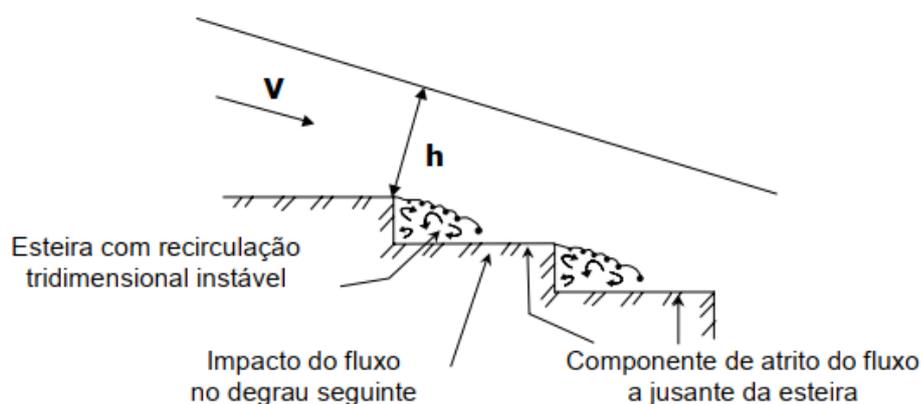
A superfície livre d'água se encontra lisa e bem definida, inicialmente. Ao longo da calha, a camada limite se desenvolve, aumentando sua espessura, até alcançar a superfície livre do escoamento, apresentando intensas perturbações.

Dentro do escoamento sobre turbilhões, Chanson (1994) classifica três sub-regimes, denominando esteira a região do degrau onde o turbilhão é formado:

### **3.2.1.3.1 ESCOAMENTO COM INTERFERÊNCIA ESTEIRA-DEGRAU – RECIRCULAÇÃO INSTÁVEL**

Em calhas de declividade menos acentuadas, a cavidade do pseudo fundo é alongada, não permitindo a formação de vórtices estáveis, gerando esteiras com instabilidade tridimensional nas cavidades dos degraus. As esteiras atuam isoladamente, sem interferir nos degraus subsequentes, representadas na Figura 3.

Figura 3 – Escoamento com interferência esteira-degrau – Recirculação instável.

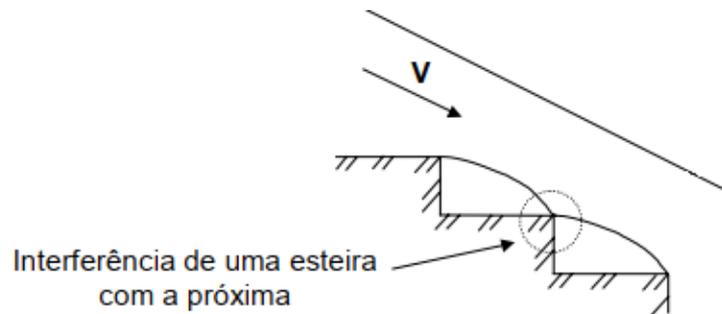


Fonte: SANAGIOTTO (2003)

### 3.2.1.3.2 ESCOAMENTO COM INTERFERÊNCIA ESTEIRA-ESTEIRA – RECIRCULAÇÃO INSTÁVEL

Com a redução do patamar, a cavidade do degrau diminui, aumentando a declividade da calha e deixando menos espaço para a esteira. A esteira começa a interagir com o degrau subsequente. (Figura 4)

Figura 4 – escoamento com interferência esteira-esteira – Recirculação instável.

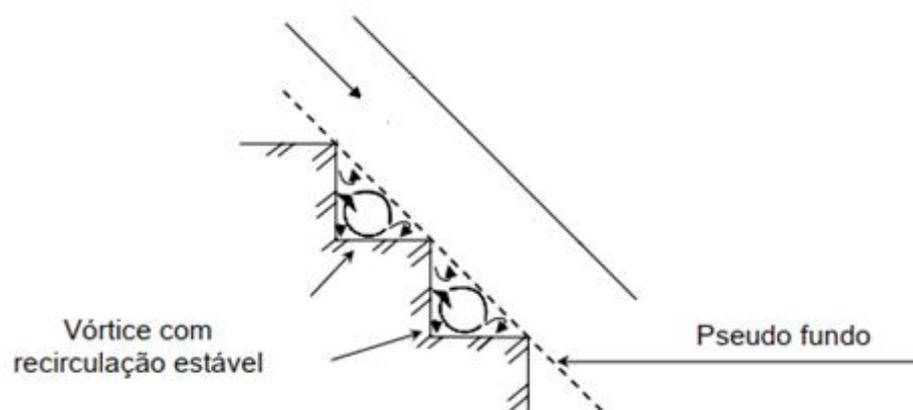


Fonte: SANAGIOTTO (2003), adaptado pelo autor.

### 3.2.1.3.3 ESCOAMENTO COM RECIRCULAÇÃO ESTÁVEL

Ocorre em paramentos ainda mais íngremes, com a formação de vórtices ocupando a região do pseudo fundo. A dissipação de energia do escoamento principal mantém os vórtices estáveis. (Figura 5)

Figura 5 – Escoamento com recirculação estável.

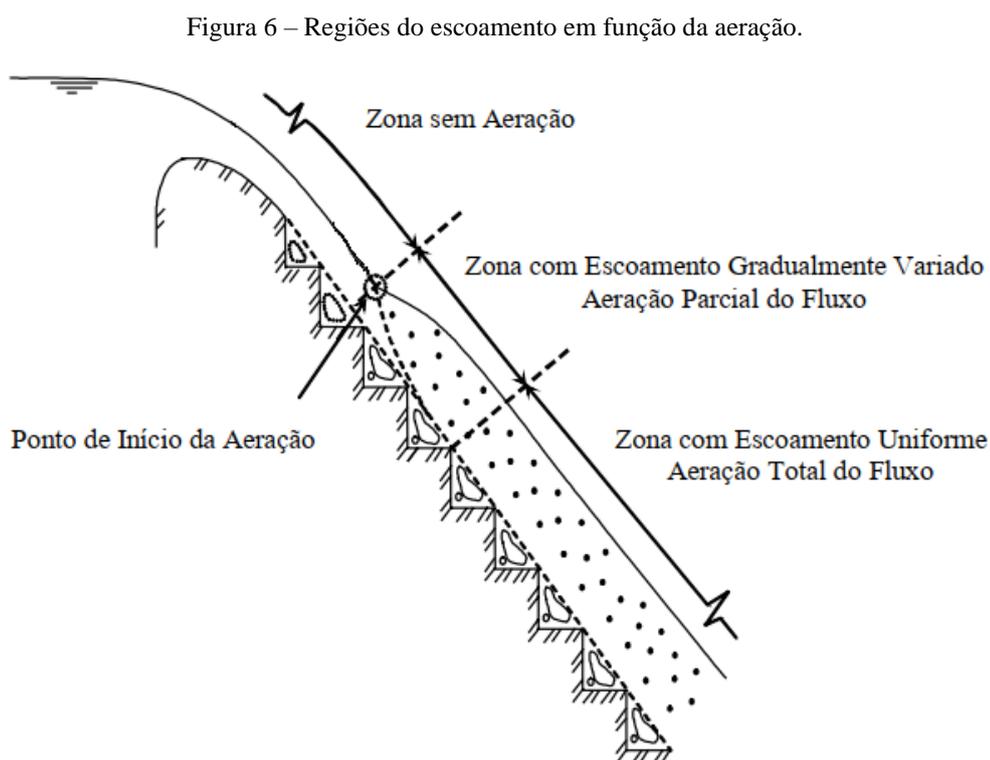


Fonte: SANAGIOTTO (2003), adaptado pelo autor.

### 3.2.2 PARÂMETROS DA AERAÇÃO NATURAL

Em um vertedouro em degraus, Tozzi (1992) defende que o processo de aeração do escoamento se inicia com o afloramento da camada limite. A altura do escoamento, após o completo desenvolvimento da aeração, se mantém constante, segundo Gomes (2006), Sanagiotto (2003), Conterato (2011), entre outros autores. Em sintonia com a altura, os valores de pressões médias, velocidades médias e quantidade de ar incorporada no escoamento tendem a valores constantes.

A Figura 6 ilustra o processo de aeração que ocorre sem ação de aeradores em um vertedouro em degraus, em um regime deslizante sobre turbilhões de recirculação estável, denominada de aeração natural.



Fonte: Chanson (1994) adaptado pelo autor

A posição do ponto de início de aeração foi estudada por diversos autores. U. S. Army Corps of Engineers (1977), para vertedouros com paramento liso em concreto, demonstram uma equação que relaciona a espessura da camada limite e a posição do escoamento. Em

vertedouros em degraus, Tozzi (1992) adaptou, para calhas com declividade de 1V : 0,75H, uma equação de calha lisa que define a espessura da camada limite turbulenta na posição de seu afloramento na superfície livre d'água, igual. A Equação 1 expressa a adaptação feita por Tozzi (1992).

$$\frac{h_a}{L_{a1}} = 0,08 \left( \frac{L_{a1}}{k} \right)^{-0,233}$$

Equação 1

Onde:

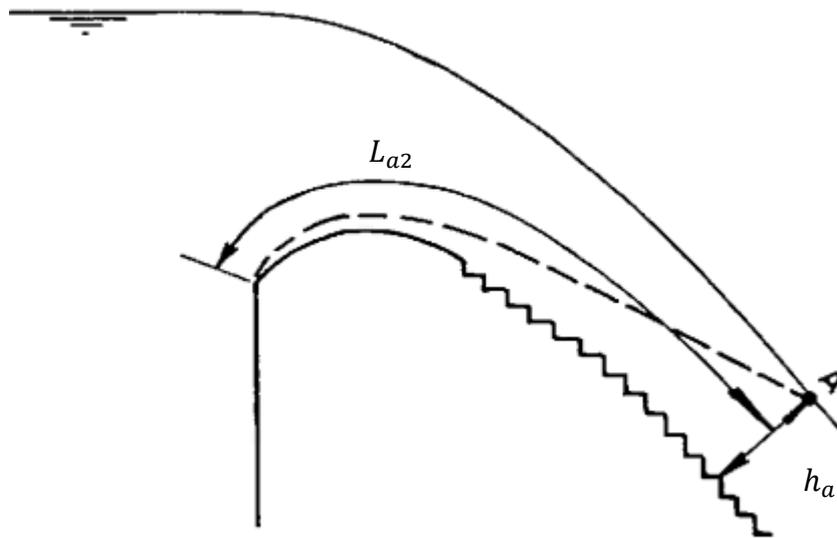
$h_a$  = altura da lâmina d'água no ponto de aeração (m)

$L_{a1}$  = distância ao longo do vertedouro desde o início da ogiva até o ponto de aeração (m)

$k$  = altura de rugosidade (m)

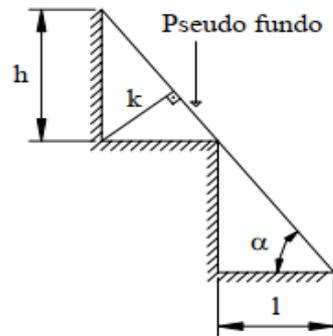
A Figura 7 e a Figura 8 ilustram os parâmetros utilizados na equação.

Figura 7 - Parâmetros do escoamento.



Fonte: Tozzi (1992) adaptado pelo autor

Figura 8 - Características geométricas dos degraus



Fonte: Simoes (2006)

Algumas das condições de concepção da Equação 1, de acordo com Tozzi (1992), são:

$$\alpha = 53,13^\circ;$$

$$0,5 \text{ cm} < k < 6,0 \text{ cm};$$

$$86,1 \text{ L/(s.m)} < q < 201,4 \text{ L/(s.m)}.$$

Tozzi (1992) inferiu que o comprimento  $L_a$  aumenta, levando o ponto de aeração inicial para jusante, para vazões maiores, com as mesmas dimensões de degrau. Com vazões constantes, o comprimento aumenta na medida que a altura dos degraus decresce, mantendo a mesma inclinação.

Diversos outros autores corroboram os ditos de Tozzi (1992) e propõem equações para determinar o ponto de início de aeração, com referência a partir do início da ogiva ou a partir da crista. Conterato (2014) elaborou uma tabela com as equações de oito autores, para posição de início de aeração e espessura da lâmina d'água no ponto de aeração. Nas equações da Tabela 1, a espessura da camada limite é igual à espessura do escoamento, no ponto de início de aeração ( $h_a$ ). O número de Froude do degrau ( $F^*$ ) condensa algumas características do escoamento, como exposto na Equação 2.

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g * k^3 * \text{sen}(\alpha)}}$$

Equação 2

Onde:

$F^*$  = número de Froude do degrau (adimensional);

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

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$k$  = altura de rugosidade (m);

$\alpha$  = declividade da calha (°).

Tabela 1 – Equações sugeridas por diversos autores para posições de início de aeração e profundidade do escoamento nessa posição.

Autor	Equações propostas	
Wood et al. (1983)	$\frac{L_{a1}}{k} = 13,6(\text{sen}\alpha)^{0,0796}F^{*0,713}$	Equação 3
	$\frac{h_a}{k} = \frac{0,223}{(\text{sen}\alpha)^{0,04}}F^{*0,643}$	Equação 4
Chanson (1994)	$\frac{L_{a1}}{k} = 9,8(\text{sen}\alpha)^{0,08}F^{*0,71}$	Equação 5
	$\frac{h_a}{k} = \frac{0,40}{(\text{sen}\alpha)^{0,04}}F^{*0,64}$	Equação 6
Matos (1999)	$\frac{L_{a2}}{k} = 6,289F^{*0,734}$	Equação 7
	$\frac{h_a}{k} = 0,361F^{*0,606}$	Equação 8
Sanagiotto (2003)	$\frac{L_{a1}}{k} = 9,7721F^{*0,7014}$	Equação 9
	$\frac{h_a}{k} = 0,3965F^{*0,5975}$	Equação 10
Amador (2005)	$\frac{L_{a2}}{k} = 5,982F^{*0,84}$	Equação 11
	$\frac{h_a}{k} = 0,385F^{*0,58}$	Equação 12
Conterato (2011)	$\frac{L_{a2}}{k} = 12F^{*(2/3)}$	Equação 13
	$\frac{h_a}{k} = \frac{1}{3}F^{*(2/3)}$	Equação 14

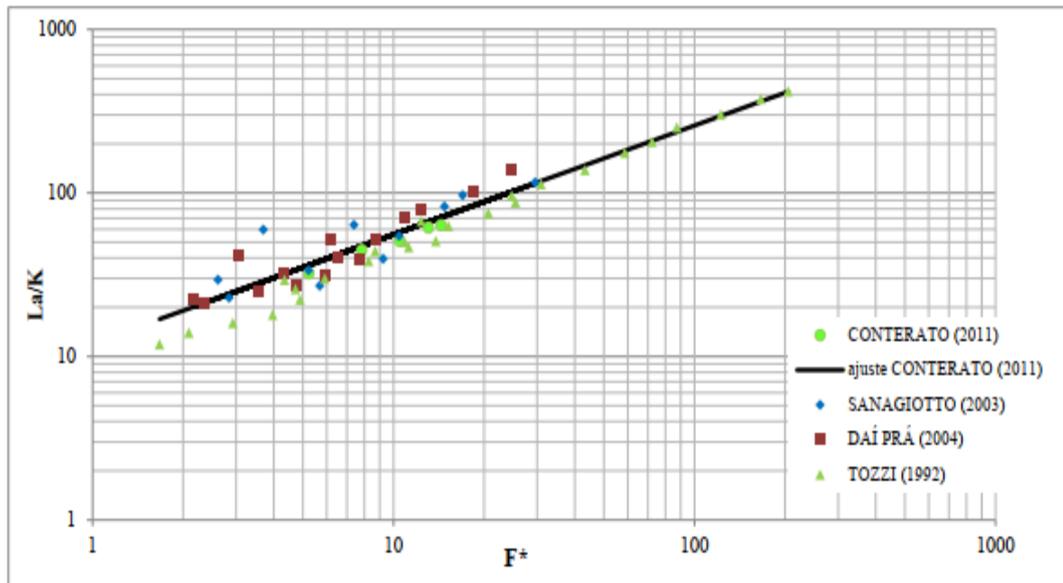
Fonte: Conterato (2014)

Os valores encontrados por diversos autores foram ajustados por Conterato (2011), para o ponto de início de aeração do escoamento, com diferentes alturas de degraus e declividades, pela Equação 13.

De forma similar, para a espessura da lâmina d'água, igual a espessura da camada limite no ponto de início de aeração, a Equação 14 de Conterato (2011) faz um ajuste da série de dados.

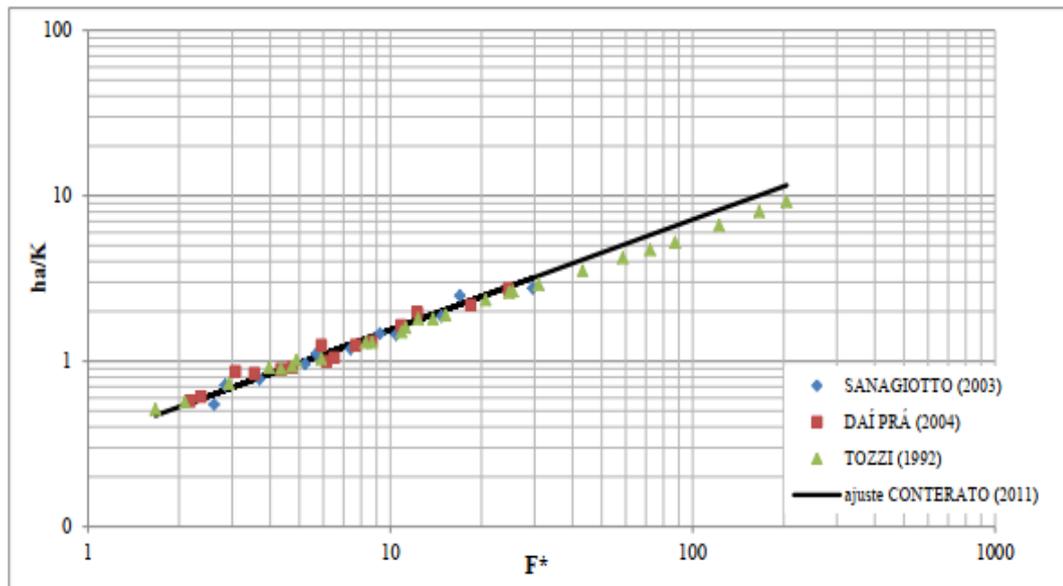
Os ajustes das Equação 13 e Equação 14 são apresentados nas Figura 9 e Figura 10.

Figura 9- Adimensionalização para o ponto de início de aeração do escoamento conforme diversos autores.



Fonte: Conterato (2014)

Figura 10 – Adimensionalização para alturas do escoamento no ponto de início de aeração conforme diversos autores.



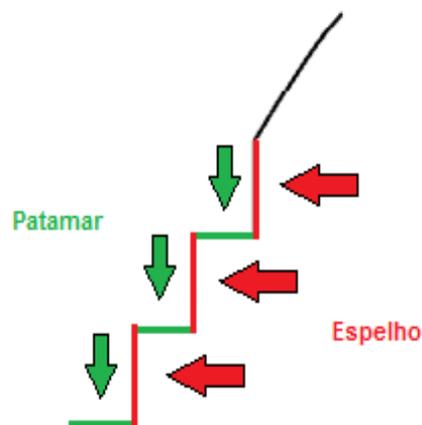
Fonte: Conterato (2014)

Determinar a altura, assim como o ponto de início de aeração do escoamento é fundamental, tendo em vista os efeitos protetores da aeração, contra processos de erosão por cavitação em vertedouros em degraus.

### 3.2.3 PRESSÕES

Sobre as pressões ao longo da calha, Tozzi (1992) observou pressões médias positivas no patamar dos degraus, próximo à quina, e pressões médias negativas no espelho, também próximo à quina. Analisando pressões instantâneas, o autor verificou a ocorrência de valores próximos a -0,5 m.c.a nos espelhos do modelo, indicando risco de cavitação nos protótipos, caso não seja estabelecido um limite de vazão específica de funcionamento. A Figura 11 ilustra a divisão das faces dos degraus entre patamar e espelho.

Figura 11 – Localização de patamar e espelho dos degraus.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em função da energia cinética do escoamento, Tozzi (1992) propôs a Equação 15 para adimensionalizar as pressões.

$$C_p = \frac{P}{V_m^2 / 2g} \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

$C_p$  = coeficiente de pressão (adimensional);

$P$  = pressão medida no modelo dividida pelo peso específico da água (m.c.a.);

$V_m$  = velocidade média do fluxo (m/s);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>).

A declividade da calha escalonada no modelo foi 53,3° para variadas alturas de degrau.

Tozzi (1992) relacionou as pressões adimensionais com a rugosidade (ilustrada na Figura 8) dos diferentes degraus ensaiados pelo autor, em duas posições fixas na calha.

Gomes (2006) ajustou modelos teóricos-experimentais sugeridos para analisar o comportamento das pressões sobre vertedouro em degraus com declividade 1V : 0,75H e degrau de  $h = 9\text{cm}$ , para diferentes vazões. A adimensionalização das pressões médias e pressões extremas utilizada pelo autor foi a mesma de Tozzi (1992). Para a posição ao longo do vertedouro, a adimensionalização proposta por Matos<sup>2</sup> (1999, apud Gomes, 2006), apresentada pela Equação 16, foi utilizada.

$$s' = \frac{(L_c - L_{a2})}{h_a} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

$s'$  = posição longitudinal (adimensional);

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

$L_{a2}$  = posição do início de aeração a partir da crista do vertedouro (m);

$h_a$  = espessura do escoamento no ponto de aeração (m).

---

<sup>2</sup> MATOS, J. S. G. – Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Dissertação de doutoramento, Instituto Técnico Superior, Portugal 1999

A profundidade do escoamento no degrau é retirada da Equação 17.

$$\frac{h_a}{k} = 0,361F^{*0,606} \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

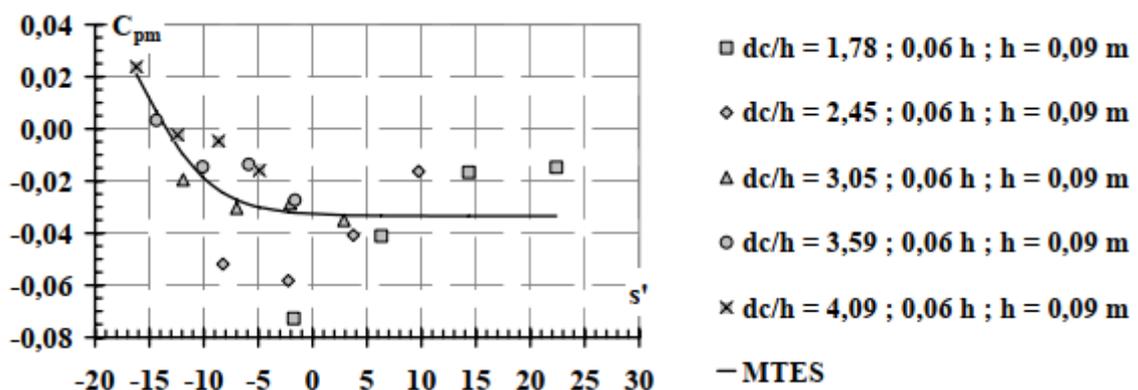
$h_a$  = espessura do escoamento no ponto de aeração (m).

$k$  = altura de rugosidade do degrau (m);

$F^*$  = número de Froude do degrau (adimensional).

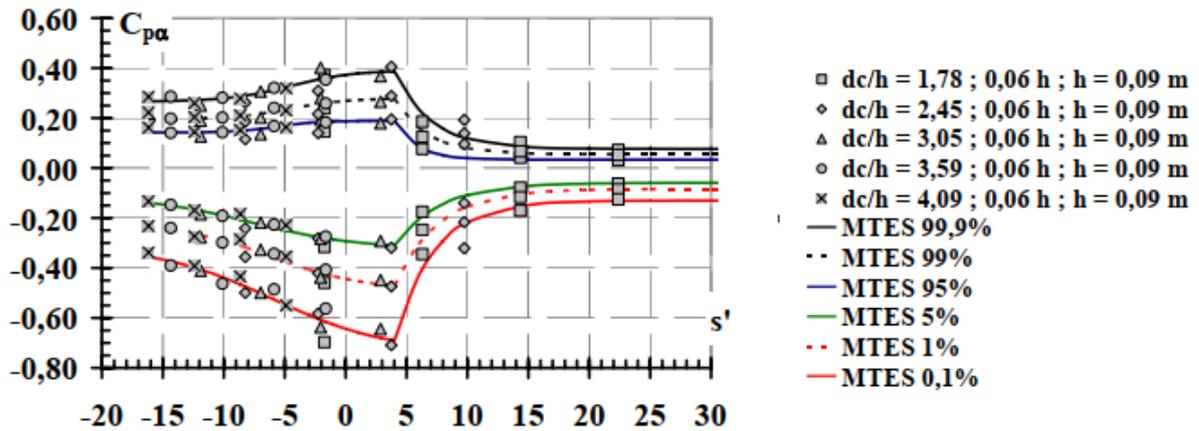
A Figura 12 e a Figura 13 apresentam a dispersão de coeficientes de pressões médias e extremas, respectivamente, bem como as equações de ajuste por modelo teórico experimental sugerido (MTES), desenvolvidas com base no ajuste de regressão dos coeficientes de pressão obtidos pelas medições experimentais realizadas em modelo físico. As pressões extremas são pressões com valores extremos (afastados da média), quantificadas de acordo com sua probabilidade de não excedência, ou seja, a probabilidade 99% significa que 99% dos dados não excedem o valor referido. Para relação entre profundidade crítica do escoamento e altura do degrau,  $\frac{d_c}{h} \leq 3$ , o modelo teórico experimental sugerido de ajuste não conseguiu simular adequadamente os resultados, segundo Gomes (2006).

Figura 12 - Coeficiente de pressão média nos espelhos ( $C_{pm}$ ).



Fonte: Gomes (2006)

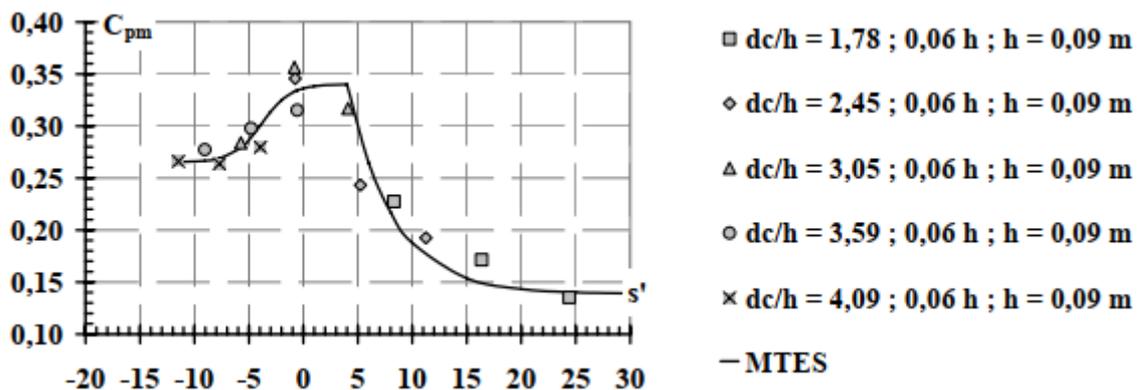
Figura 13 – Coeficientes de pressões extremas nos espelhos ( $C_{pa}$ ).



Fonte: Gomes (2006)

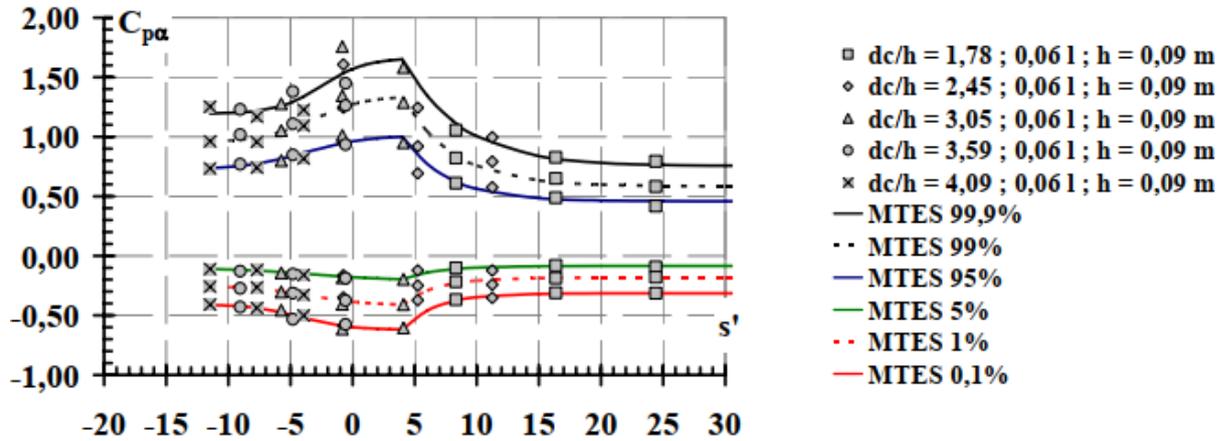
A mesma abordagem foi realizada para o patamar dos degraus, resultando em gráficos semelhantes, onde a pressão média no patamar dos degraus é, via de regra, positiva e maior em módulo, comparando com as pressões no espelho dos degraus. A Figura 14, ilustra os coeficientes de pressões médias no patamar dos degraus.

Figura 14 - Coeficiente de pressão média nos patamares ( $C_{pm}$ ).



Fonte: Gomes (2006)

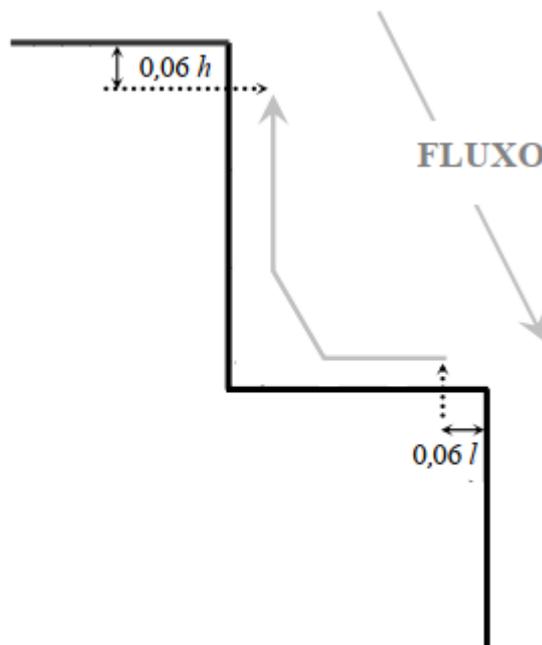
Figura 15 - Coeficientes de pressões extremas nos patamar ( $C_{p\alpha}$ ).



Fonte: Gomes (2006)

A posição das tomadas de pressão utilizadas por Gomes (2006) fica melhor compreendida a partir da Figura 16.

Figura 16 – Posição adimensional das tomadas de pressão utilizadas por Gomes.

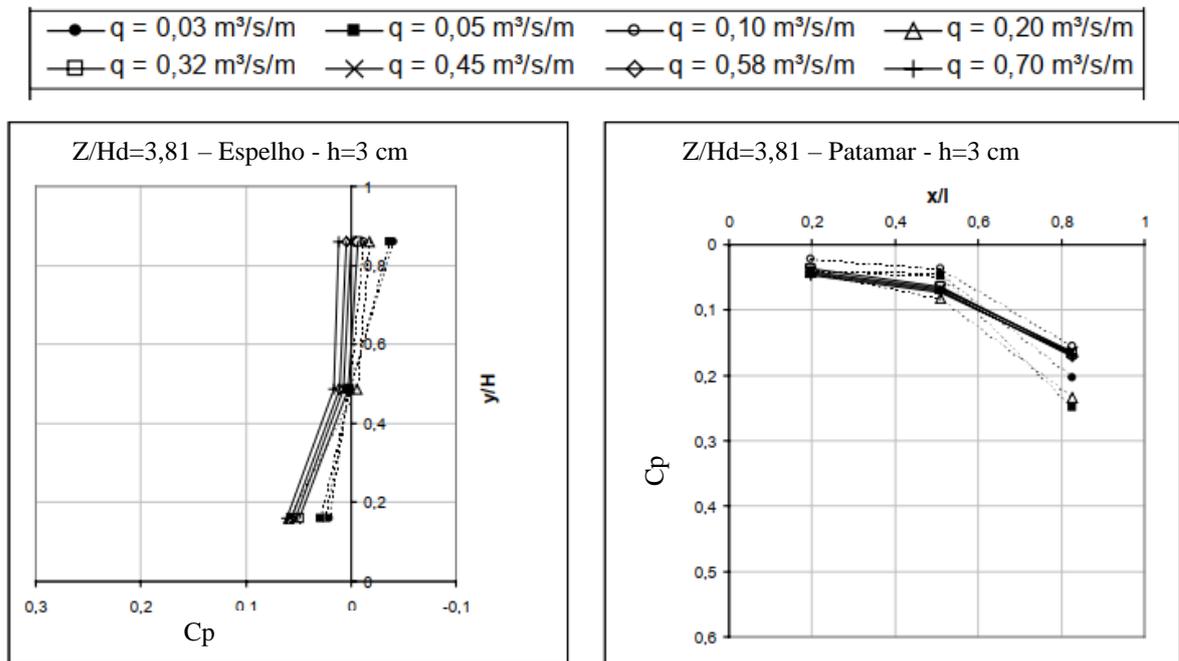


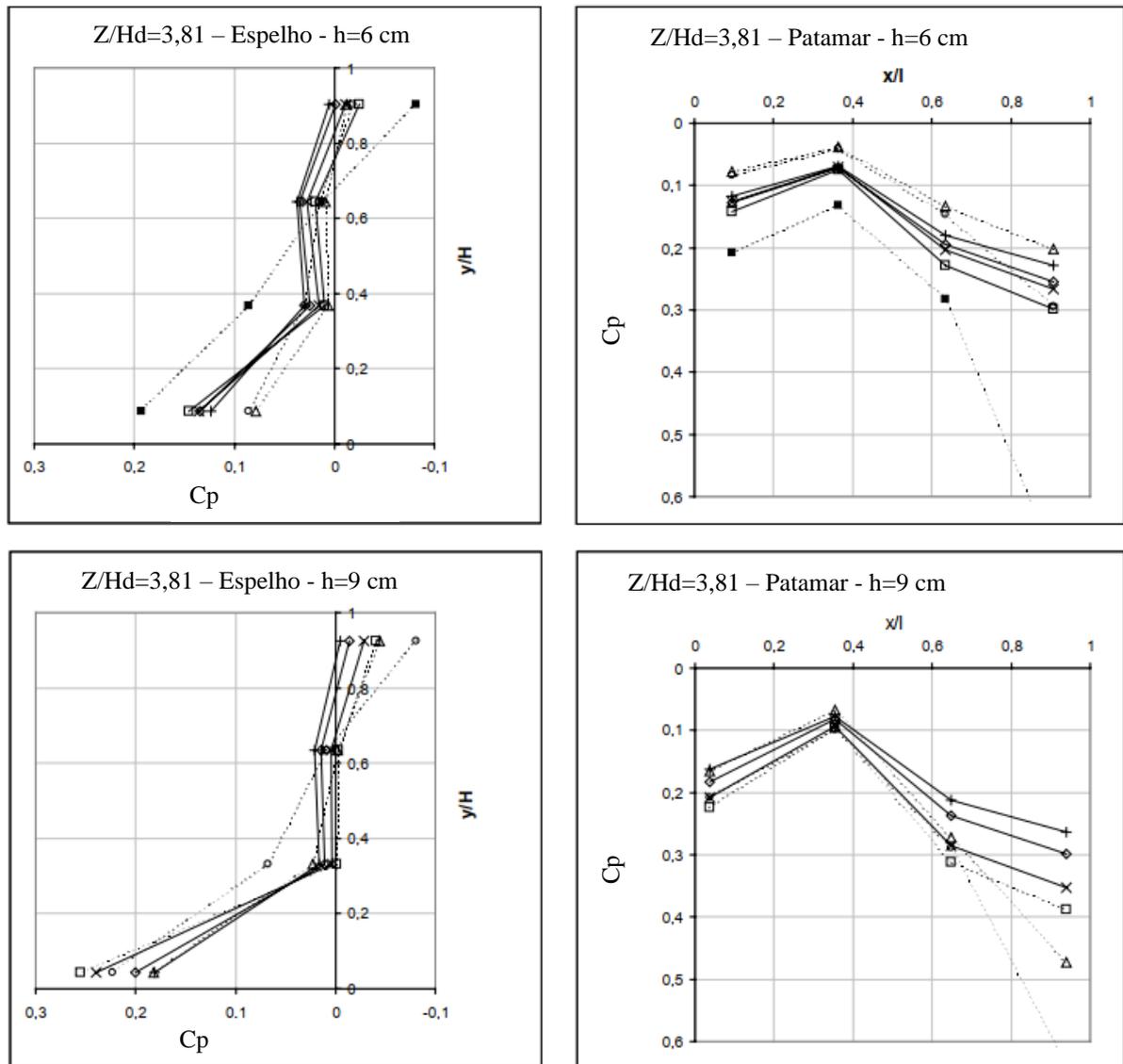
Fonte: Gomes (2006) adaptado pelo autor.

Sanagiotto (2003) utiliza a adimensionalização das pressões proposta na Equação 15 em três diferentes dimensões de degraus ( $h=3$ ,  $h=6$  e  $h=9$  cm). Nos gráficos da Figura 17, os degraus analisados são identificados através da relação  $Z/H_d = 3,81$ , onde  $Z$  representa a distância vertical da crista até o degrau analisado e  $H_d$  representa a carga de projeto. Os parâmetros de posição partem da quina interna ( $x=0$  e  $y=0$ ) do degrau, até a quina externa do degrau ( $x=l$  e  $y=h$ ), ensaiados em uma calha com declividade  $1V : 0,75H$  (para degrau com espelho  $h=6$  cm, a dimensão do patamar é  $l=4,5$  cm).

Dada a análise dos gráficos de Sanagiotto (2003) na Figura 17, a região do degrau onde ocorrem as pressões médias mais perigosas à estrutura é próxima a quina externa, com pressões negativas nos espelhos e positivas nos patamares. Os tracejados correspondem à ocorrência de escoamento aerado.

Figura 17 – Pressões médias adimensionalizadas com relação á energia cinética do escoamento.





Fonte: Sanagiotto (2003)

### 3.3 CAVITAÇÃO

Cavitação, via de regra, ocorre em um líquido quando determinadas características dinâmicas ocasionam uma queda de pressão abaixo da pressão de vapor do líquido. Peterka (1953) estudou a interação desse fenômeno em estruturas hidráulicas de concreto. Segundo ele, as cavidades (bolhas de vapor), formadas pela pressão no líquido abaixo da pressão de vapor, entram em colapso quando a pressão no líquido retorna a valores acima da pressão de vapor. O colapso dessas bolhas remove pequenas partículas de concreto, quando ocorre

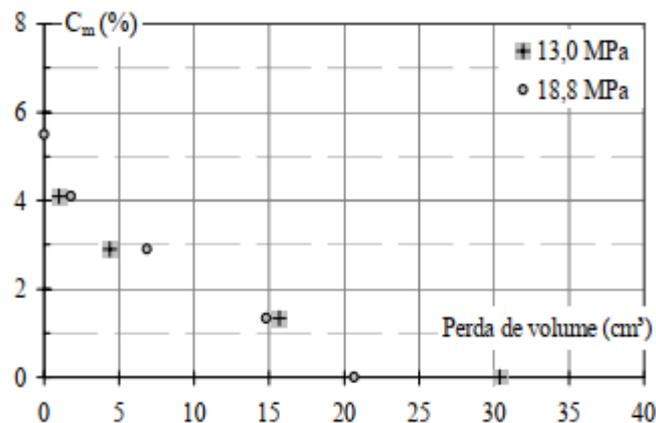
próximo à estrutura. Sérios problemas de erosão por cavitação podem ocorrer com a presença desse fenômeno ao passar do tempo.

A inclusão de ar em escoamentos rápidos sobre paramentos hidráulicos de concreto reduz a chance de erosão e cavitação, segundo Peterka (1953). A partir do estudo citado, outros autores abordaram a relação entre concentração de ar no escoamento e a ocorrência de erosão e cavitação em estruturas de concreto.

De acordo com Quintela e Ramos (1980), os impactos de ondas de pressão que se formam a partir do colapso das bolhas de cavitação podem ser absorvidos por um escoamento água-ar, compressível e elástico.

Russell e Sheehan (1974) analisaram a perda de volume de dois tipos de concreto, 13 e 18 MPa, expostos a um escoamento de velocidade média igual a 46 m/s, com diferentes concentrações de ar. Os resultados da análise são apresentados na Figura 18.

Figura 18 - Influência da aeração na mitigação de erosão do concreto exposto a escoamentos de velocidade média igual a 46 m/s.



Fonte: Russell e Sheehan (1974).

No gráfico,  $C_m$ (%) representa a concentração média de ar no escoamento. A perda de volume de concreto, ocasionada pela erosão por cavitação, é menor quanto maior a concentração média de ar, de acordo com o gráfico.

Volkart e Rutschmann (1984) afirmam que a integridade do vertedouro pode ser mantida através da aeração do escoamento, para um vertedouro de calha lisa. O aumento da compressibilidade da mistura água-ar permite que o escoamento absorva as explosões das

bolhas de cavitação. A compressibilidade da mistura aumenta em um fator de 10, com a presença de 0,1% de bolhas de ar (maiores que as de cavitação) no escoamento, aproximadamente.

Em calhas escalonadas, a importância da aeração mantém o mesmo princípio descrito por Volkart e Rutschmann (1984). Gomes (2006) escreve sobre a incipiência a cavitação em determinados modelos de previsão, na região não-aerada de vertedouros em degraus, onde a quantidade de ar é insuficiente para proteger a superfície sólida.

De acordo com Novák<sup>3</sup> et al. (1990, apud Arantes 2007), modelos reduzidos de vertedouros em degraus não correm risco de cavitação porque a pressão atmosférica não acompanha a redução em efeito de escala no modelo, mesmo que as condições, transportadas ao protótipo, indiquem cavitação.

### 3.4 ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA POR AERADOR

Qualquer dispositivo aerador deve atender as seguintes condições, segundo Volkart e Rutschmann (1984):

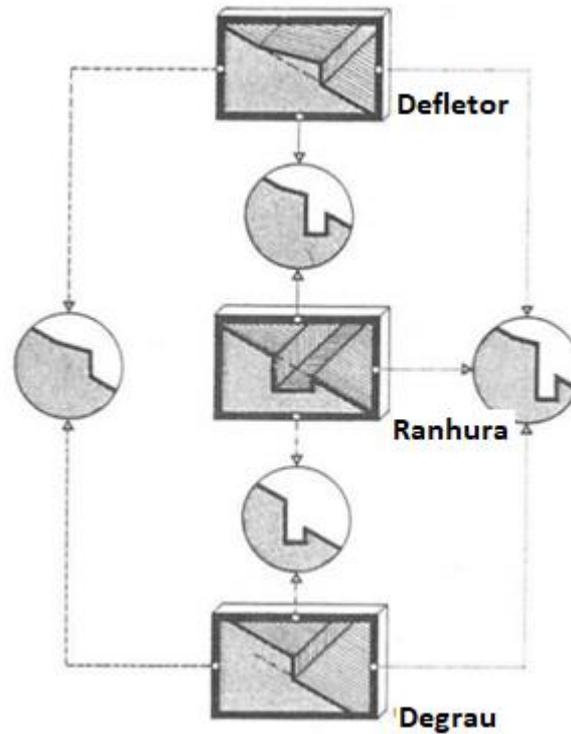
- Permitir a entrada de ar, tornando alta a concentração de ar nas regiões com risco de erosão e cavitação;
- Ter uma geometria simples e econômica, além de prevenir a erosão do próprio dispositivo.

Alguns exemplos de dispositivos que seguem tais características, de acordo com Volkart e Rutschmann (1984), são defletores, sulcos e desníveis, além de combinações entre um e outro. A Figura 19 demonstra os dispositivos e suas combinações.

---

<sup>3</sup> Novák, P. A.; MOFFAT, I. B.; NALLURI, C.; NARAYANAN, R. **Hydraulic structures**. Unwin Hyman, London, UK. 1990.

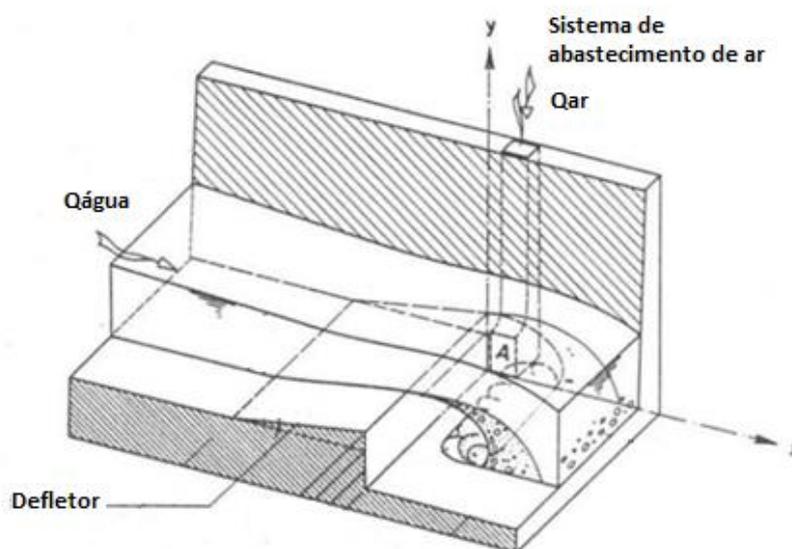
Figura 19 – Principais dispositivos aeradores e suas combinações.



Fonte: Volkart e Rutschmann (1984), adaptado pelo autor

Além dos aeradores, sistemas de suprimento de ar agregam ao conjunto, abastecendo o aerador, mantendo a vazão de ar arrastada pelo escoamento. A Figura 20 ilustra um possível conjunto mencionado.

Figura 20 - Sistema aerador (defletor + degrau) e chaminé de abastecimento de ar.



Fonte: adaptado de Volkart e Rutschmann (1984)

A utilização de aeradores em estruturas extravasoras de calha lisa é analisada por Quintela e Ramos (1980), enumerando diversas barragens e detalhando as características de seus sistemas de aeração do escoamento. Após passar pelo bordo livre de um aerador, a face inferior do jato formado pelo escoamento arrasta determinada quantidade de ar desta região, sendo continuamente substituído por ar proveniente do exterior.

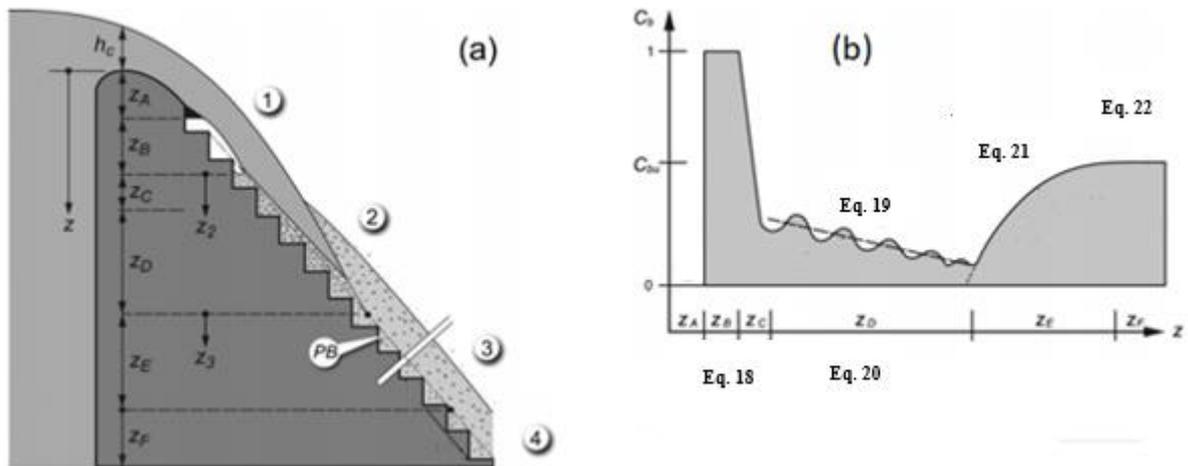
A disposição das estruturas e suas características geométricas influenciam na entrada de ar no escoamento. Segundo Quintela e Ramos (1980), a entrada de ar depende da distância entre o aerador e a seção de impacto do jato, bem como do tipo de aerador. A vazão de ar que se mistura ao escoamento depende do tipo e dimensões do aerador, e também da perda de carga decorrente do conduto que transporta o ar, segundo Galperin et al. <sup>4</sup> (1977, apud Quintela e Ramos, 1980)

Pfister et al. (2006) analisam a concentração de ar junto ao fundo da calha ( $C_b$ ) em escoamentos sobre vertedouros em degraus com a utilização de aeradores e um sistema de fornecimento de ar. O autor propôs 5 equações que descrevem a concentração de ar junto ao fundo (bottom air concentration), dentro de 4 regiões do escoamento, conforme a Figura 21.

---

<sup>4</sup>Galperin, R. S. et al., 1977 – Protecção contra a cavitação pelo arejamento da camada limite. Cavitação em estruturas hidráulicas. Moscovo (em Russo). Tradução para português, n° 698, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 1979, Lisboa.

Figura 21 – (a) ilustração do escoamento e (b) concentração de ar junto ao fundo em relação à distância da crista.



Fonte: adaptado de Pfister et al. (2006)

Na ogiva, a concentração de ar do escoamento junto ao fundo da calha é igual a 0. Ao final do defletor, com o descolamento do jato em relação ao paramento escalonado, a concentração de ar junto ao fundo é igual à concentração de ar no sistema de suprimento de ar, 100%. Através da Equação 18 é possível inferir qual o degrau de impacto do jato.

Na região 2, com o impacto do jato na calha escalonada, a concentração de ar junto ao fundo diminui bruscamente, visto que os degraus imediatamente acima do impacto do jato estão expostos ao fluxo de ar fornecido ao sistema.

A jusante do impacto, a camada de escoamento aerada começa a se expandir em direção a superfície, diminuindo a concentração de ar junto ao fundo no escoamento. Pfister et al. (2006) aproximam essa redução, inesperadamente senoidal, por uma equação representando a redução média de concentração.

Em paralelo à redução de concentração de ar junto ao fundo, o ar da superfície livre adentra ao escoamento em direção ao pseudo-fundo. A jusante do ponto de encontro entre as duas aerações, a concentração de ar junto ao fundo aumenta até um valor de concentração de ar uniforme ( $C_{bu}$ ). A Tabela 2 agrega as equações utilizadas na elaboração da Figura 21 (b).

Tabela 2 – Equações propostas por Pfister et al. (2006) relacionando concentrações de ar e distância da crista.

Equação	Condição	
$\frac{Z_B}{h_c} = 0,16 * (\frac{h_c}{Z_A})^{-2}$	Para; $0,2 < h_c/Z_A < 1$	Equação 18
$C_{bm} \frac{h_c}{h} = 0,1 * 10^{-0,035n}$	Para; $n \geq 0$	Equação 19
$\frac{Z_D}{h} = 1,5 (\frac{h_c}{h})^2$	Para; $1 < \frac{h_c}{h} < 3$	Equação 20
$C_b/C_{bu} = \tanh[0,22(\frac{Z_3}{h})]$	Para; $Z_3 \geq 0$	Equação 21
$C_{bu} = 0,268 - 5,69 * 10^{-3} F^*$	Para; $\alpha = 50^\circ$ $F^* = [\frac{q}{g * \text{sen}\alpha * h^3}]^{1/2}$	Equação 22

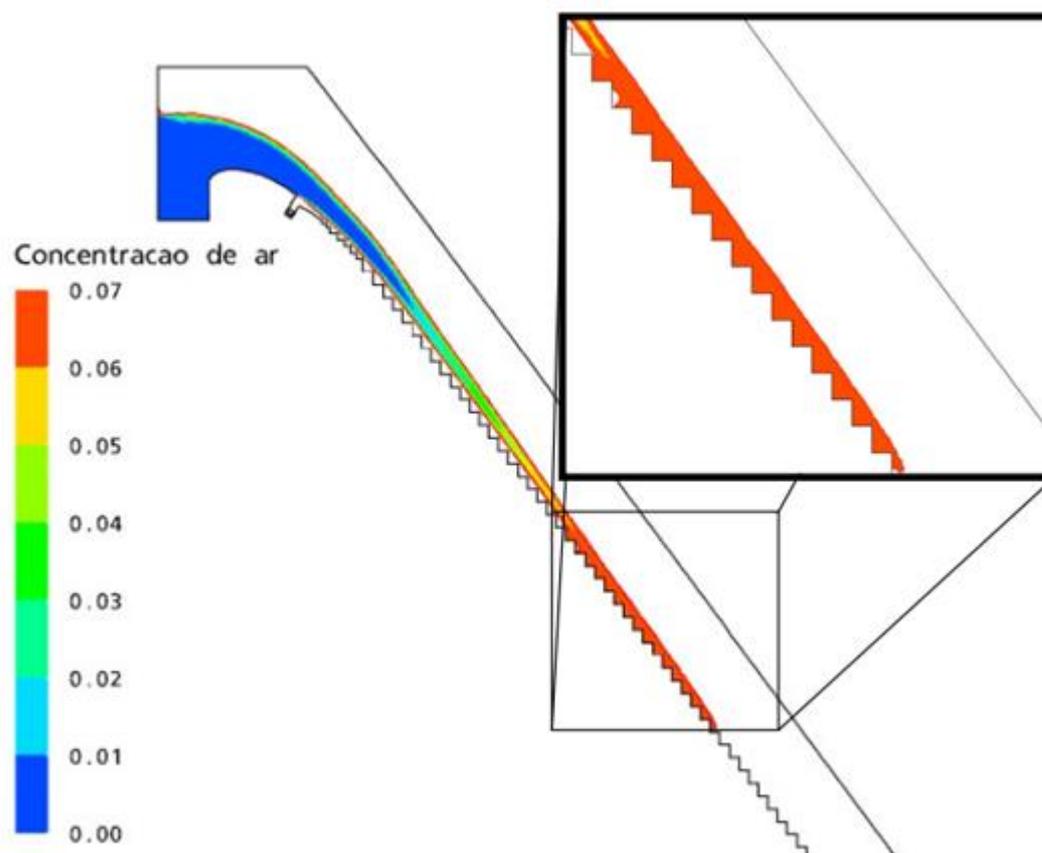
Fonte: elaborado pelo autor.

Arantes (2007), relata que cavitação é o fenômeno responsável por limitar vertedouros em degraus a vazões específicas da ordem de 10 m<sup>3</sup>/s/m a 15 m<sup>3</sup>/s/m. A introdução de ar no escoamento é um método de evitar o risco de cavitação e foi simulada numericamente pelo autor em um vertedouro em degraus com aeração induzida, de declividade 1V: 0,75H, e vazão específica máxima de 11,7 m<sup>3</sup>/s/m.

Como resultado, Arantes (2007) concluiu que o aerador promove entrada de ar suficiente no escoamento para evitar ocorrência de cavitação nos degraus mais próximos da entrada de ar. Em paralelo, a energia dissipada pelos degraus foi reduzida em até 13%, comparando com uma estrutura similar sem aerador devido a diferente interação do fluxo aerado com as rugosidades.

A Figura 22 expressa valores de concentração de ar em escalas de cor, ao longo da calha.

Figura 22 – Concentração de ar no escoamento entre 0% e 7%, com aerador de fundo desenvolvido e estudado por Arantes (2007)



Fonte: Arantes (2007)

Novakoski et al. (2019) ajustou equações para determinar a posição de ocorrência das trocas de região. As regiões analisadas por Novakoski et al. (2019) são três principais, sendo a região *completamente aerada* subdividida em outras três sub-regiões:

- Geração do jato;
- Redução de água preta;
- Região completamente aerada;
  - Regime de transição;
  - Fluxo gradualmente variado;
  - Região de escoamento quase-uniforme

Água preta é caracterizada por ser transparente e não possuir concentração de ar perceptível a olho nu.

Os ensaios foram realizados em modelo físico, presente no Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) – FURNAS/RJ. As principais características do modelo são ilustradas pela Tabela 3.

Tabela 3 – Dados do modelo utilizados por Novakoski et al. (2019)

<b>DADOS DO MODELO</b>	
Altura do degrau (m) - h	0,09
Patamar do degrau (m) - l	0,0675
k (m)	0,054
dL (m)	0,1125
Largura da calha (m) - B	1,15
Declividade da calha - $\alpha$ (°)	53,13
Altura do modelo - Y (m)	2,3

Fonte: elaborado pelo autor.

Durante a realização dos ensaios, foram utilizadas vazões entre 115 e 409 l/s, resultando em números de Froude entre 6,1 e 3,77.

A Equação 23 foi desenvolvida com o objetivo de determinar o comprimento da posição característica dos fenômenos observados por Novakoski et al. (2019), de acordo com os parâmetros apresentados em sequência.

$$F_r = a \left( \frac{L_{ref}}{h_0 \text{sen}\theta} \right)^b \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

$F_r$  = Número de Froude (adimensional);

$L_{ref}$  = Comprimento a partir do fim da ogiva até a posição característica de referência (m);

$h_0$  = Altura da lâmina d'água no fim da ogiva (m);

$\text{sen}\theta$  = Seno do ângulo entre a calha e o defletor (°);

$a$  e  $b$  = Coeficientes relacionados com a posição característica de referência.

Os valores de  $a$  e  $b$  estão apresentados na Tabela 4, de acordo com o fim da região analisada.

Tabela 4 – Coeficientes utilizados na Equação 23, de acordo com a posição de referência.

Posição característica	$a$	$b$	$R^2$
Impacto do jato	0,89	0,367	0,97
Fim da água preta	0,73	0,40	0,85
Início do fluxo gradualmente variado	0,40	0,49	0,74
Início do escoamento quase-uniforme	0,40	0,47	0,99

Fonte: Novakoski et al.(2019)

A Tabela 4 demonstra, além dos valores de  $a$  e  $b$ , os valores de  $R^2$ , demonstrando a precisão de cada equação determinada.

### 3.4.1 CONDIÇÕES DE ENTRADA DE AR

Segundo Matos (1990), mantidas constantes as características geométricas do aerador, o fenômeno de entrada de ar pode ser representado pela relação entre vazão de ar e vazão de água. A Equação 24 demonstra essa relação.

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

O parâmetro  $\beta$ , denominado coeficiente de aeração, é geralmente utilizado para representar o processo de entrada de ar por aeradores no escoamento. Pinto et al. <sup>5</sup> (1981, apud Matos 1990) propõem uma estimativa simplificada para determinação do coeficiente  $\beta$ , a partir da proporção entre o comprimento do jato e a espessura do escoamento

<sup>5</sup>Pinto, N.; Neidert, S., Model prototype conformity in aerated spillway flow, Proc. International Conference on the Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures, BHRA Fluid Engineering, Coventry, England, Sept., 1982.

imediatamente a montante do defletor, ajustadas por um coeficiente constante, de acordo com o de fletor e do sistema de abastecimento de ar.

Volkart e Rutschmann (1984) apontam a relação entre o comprimento do jato com a velocidade do escoamento e com a geometria do aerador utilizado, apontando o comprimento do jato com a variável mais significativa na determinação do  $\beta$ .

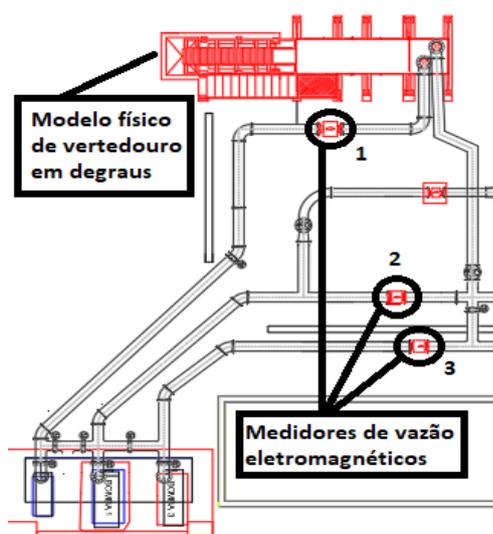
## 4 METODOLOGIA

Para caracterização das regiões do escoamento, aquisição e análise de dados, o texto apresentará o modelo físico, os equipamentos utilizados, as condições utilizadas nos ensaios realizados e a metodologia de análise nas instalações do Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS.

### 4.1 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

A instalação do laboratório, onde o modelo físico está inserido, é composta por um reservatório inferior, uma sala com três bombas em paralelo (25CV, 50CV e 75CV), cada um com um inversor de frequência, em nível com o reservatório inferior e um sistema de condutos forçados de 300 mm de diâmetro. As tubulações, após chegarem na cota do pavilhão, se interconectam, de forma que qualquer modelo pode ser abastecido por qualquer bomba do laboratório, como demonstra a Figura 23. A numeração dos medidores de vazão na Figura 23 é a mesma da Figura 24, identificando-os individualmente.

Figura 23 – Layout da tubulação de abastecimento e do modelo físico



Fonte: acervo LOH adaptado pelo autor

Cada ramificação da tubulação possui um medidor de vazão eletromagnético, possibilitando ajustar, através do inversor de frequência, a vazão de água desejada durante o ensaio. Os medidores utilizados nos ensaios, cada um instalado em uma ramificação de abastecimento do modelo, estão ilustrados na Figura 24.

Figura 24 – Medidores de vazão



Fonte: acervo LOH adaptado pelo autor

As principais características dos medidores, ilustrados na Figura 24, estão dispostas na Tabela 5.

Tabela 5 – Informações relacionadas aos medidores de vazão utilizados

Identificação do medidor, de acordo com a Figura 24:	Medidor de vazão 1	Medidor de vazão 2	Medidor de vazão 3
Marca:	Siemens	Emerson Process Management	Incontrol
Modelo:	MAG5100W DN 300 sensor	Rosemount 8732	Cv1000
Erro:	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,25\%$	$\pm 0,25\%$
Faixa de medição:	19 - 250 l/s	19 - 250 l/s	19 - 250 l/s

Fonte: elaborado pelo autor

### 4.1.1 DESCRIÇÃO DO MODELO

O modelo físico, apresentado na Figura 25, é composto por duas tubulações que abastecem o modelo pelo fundo do reservatório, no extremo oposto da calha, de 300 mm de diâmetro cada, um reservatório superior e um canal vertedouro, composto de ogiva lisa e calha escalonada.

Figura 25 – Modelo físico em estrutura metálica instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.1.1 O RESERVATÓRIO

O reservatório, responsável por estabilizar a vazão vertente pelo vertedouro, pode ser dividido em dois reservatórios, chamados aqui de reservatório de chegada e reservatório de

saída. A Figura 26 ilustra a disposição dos reservatórios de estabilização no modelo, bem como a localização das tubulações de abastecimento do modelo.

Figura 26 – Disposição dos reservatórios de estabilização no modelo



Fonte: elaborado pelo autor.

O reservatório de chegada possui uma tampa, com a finalidade de evitar que a água extravase pela borda superior do reservatório, devido à alta turbulência da chegada. Na transição de um reservatório para outro, existe um desnível, diminuindo a profundidade total do reservatório de saída.

No reservatório de saída um tranquilizador foi instalado, para diminuir a perturbação do escoamento. O tranquilizador é formado por tijolos de seis furos, colocados paralelos ao escoamento, fazendo com que a água passe pelos orifícios em direção à calha, amarrados por arames de ferro. A montante da ogiva, a redução de largura do modelo foi prolongada, mantendo a largura de 0,5 m da calha, dando mais estabilidade ao escoamento. O canal de aproximação foi construído com duas placas de alumínio, paralelas ao escoamento, fixadas com fitas também de alumínio, parafusadas nas placas e nas bordas do modelo. A Figura 27 ilustra as estruturas comentas neste parágrafo.

Figura 27 – Estruturas internas dos reservatórios



Fonte: elaborado pelo autor.

Com o objetivo de aferir a altura de lâmina d'água no reservatório, foi instalada uma ponteira linimétrica próxima ao fim do canal de aproximação.

#### 4.1.1.2 CANAL VERTEDOURO

O modelo físico possui inclinação da calha de  $1V : 0,75H$ , 55 degraus de 0,06 metros de altura cada, com largura de 0,5 metros e uma queda de 4 metros da crista da ogiva até o último degrau. Depois do último degrau, não possui bacia de dissipação, de modo que a água retorna ao reservatório inferior do laboratório, formando um circuito fechado de reaproveitamento da água. A Figura 28 ilustra a calha do modelo utilizado nos ensaios deste trabalho.

Figura 28 – Calha escalonada



Fonte: elaborado pelo autor.

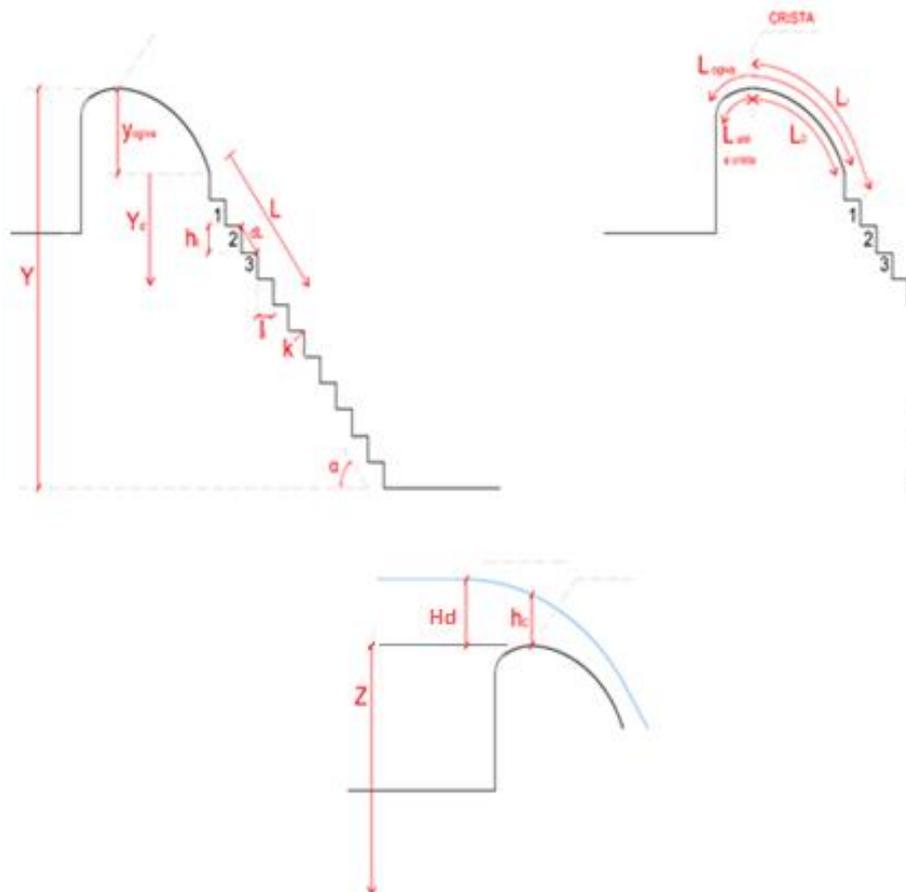
De modo a organizar os parâmetros dimensionais do modelo, a Tabela 6 resume os principais parâmetros do modelo físico. A Figura 29 elucida as referências dos parâmetros resumidos pela tabela

Tabela 6 – Resumo de parâmetros do modelo físico instalado

DADOS DO MODELO	
Altura do degrau (m) - h	0,060
Patamar do degrau (m) - l	0,045
L ogiva (m)	0,603
L até a crista (m)	0,083
L a partir da crista (m) = $L_o$	0,520
$L_i$ (m)	0,595
dL (m)	0,0750
Largura da calha (m) - B	0,500
$\alpha$ (°)	53,13
Y (m)	4,000
k (m)	0,036
Yogiva (m)	0,29

Fonte: acervo LOH.

Figura 29 - Ilustração para referência dos parâmetros do modelo físico instalado



Fonte: acervo LOH.

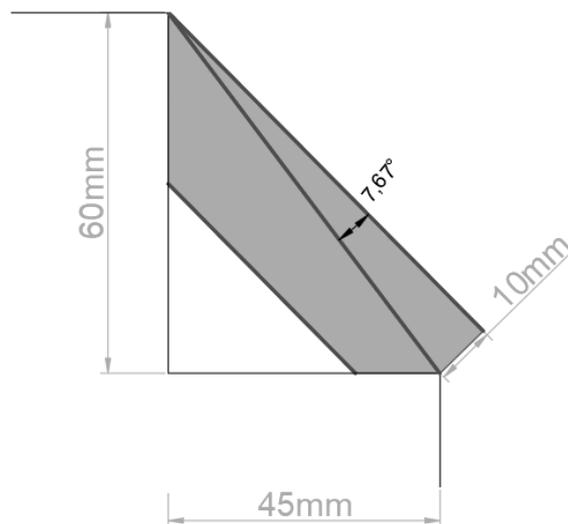
## 4.1.2 ESTRUTURAS AERADORAS

Duas estruturas foram anexadas à calha do vertedouro, formando o sistema de aeração induzida utilizado no ensaio. No primeiro degrau, um defletor acrílico foi fixado com silicone transparente, evitando a passagem de água entre as arestas da peça e o modelo. O espelho do primeiro degrau é formado por uma peça acrílica encaixada no modelo, conectando-o à câmara de ar. Os ensaios foram realizados com duas formas distintas de entrada de ar. A entrada sem soprador (SS) ocorre devido à sucção na região do espelho ligado à câmara. Para forçar a entrada de quantidades pré-determinadas de ar no escoamento, foi utilizado um soprador, a fim de resultar em valores conhecidos de  $\beta$ .

### 4.1.2.1 DEFLETOR

Respeitando uma das características de um aerador, enumeradas por Tozzi (1992), o defletor utilizado possui geometria simples, como demonstrado na Figura 30.

Figura 30 – Detalhe da geometria do defletor



Fonte: acervo LOH.

O defletor foi colado ao longo de toda a largura do primeiro degrau, logo após o fim da ogiva. A Figura 31 ilustra a localização do defletor na calha.

Figura 31 – Localização do defletor na calha



Fonte: acervo LOH, adaptada pelo autor

#### 4.1.2.2 CÂMARA DE AR

Logo a jusante do defletor, no espelho do primeiro degrau, foi instalada uma câmara de ar, responsável por suprir a demanda de ar, gerada pelas pressões negativas do escoamento. A câmara em questão consiste em uma caixa acrílica, parafusada e vedada com silicone, acompanhada de uma tubulação de PVC, de diâmetro = 75 mm e comprimento = 0,69 m, fixa ao fundo da caixa, aberta nas duas pontas. No tubo de PVC, um medidor de velocidade de ar foi instalado, tornando possível aferir a vazão passando pelo tubo. Na Figura 32 é possível visualizar a câmara acrílica instalada, sem a tubulação.

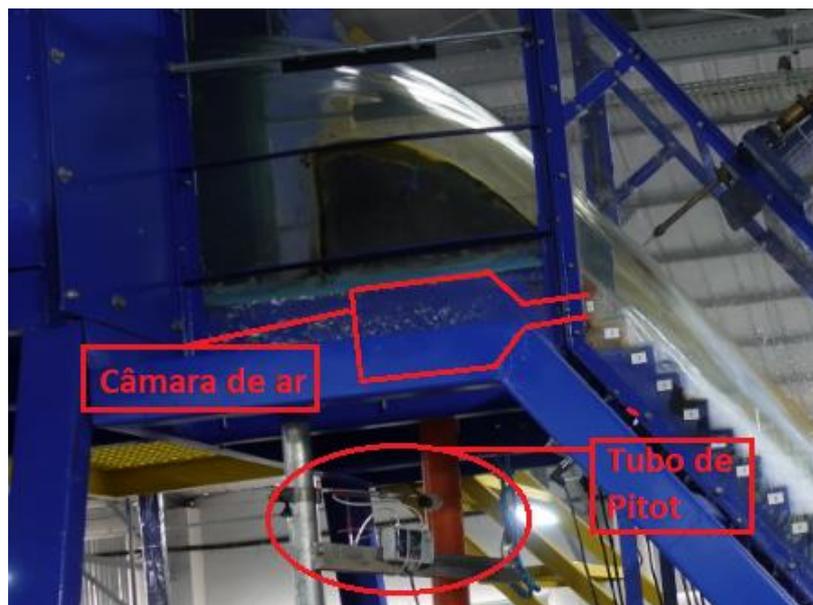
Figura 32 – Câmara de ar instalada abaixo da ogiva, sem tubulação



Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 33 ilustra a localização da câmara em relação à calha do modelo físico e a sonda de Pitot-Prandtl, utilizado para medir a velocidade do ar no eixo da tubulação de PVC.

Figura 33 – Localização da câmara de ar em relação ao modelo



Fonte: acervo LOH, adaptada pelo autor

Durante ensaios sem soprador, a medição de ar foi realizada com sonda de Pitot-Prandtl, para cada vazão ensaiada. O medidor de velocidade identificou a quantidade de ar entrando no escoamento, correspondente a configuração específica, diferente para cada ensaio.

Para atingir os valores de vazão de ar desejados nos demais ensaios, a entrada de ar pela câmara foi forçada por um soprador, ajustado a um inversor de frequência, até que o medidor de velocidade instalado na tubulação de PVC informasse a velocidade correspondente à relação entre  $Q_{\text{água}}$  e  $Q_{\text{ar}}$  ( $\beta$ ) desejada. A medição de ar também foi realizada com sonda de Potot-Prandtl.

A Figura 34 ilustra a conexão entre o soprador e a tubulação.

Figura 34 - Sistema soprador de ar



Fonte: Acervo LOH

### 4.1.3 AQUISIÇÃO DE DADOS

Os dados qualitativos, como caracterização das regiões, foram adquiridos por análise visual de diferentes ângulos do escoamento (frontal e lateral), buscando pontos característicos e alterações de comportamento, exemplificada pelo impacto do jato, e mudança de coloração, exemplificada pelo fim da água preta.

A partir das diferentes características e comportamentos, os degraus de referência onde os fenômenos ocorrem foram registrados, possibilitando futuras comparações.

Para realizar as aquisições de pressão, diversos equipamentos foram utilizados nos ensaios, formando um sistema de aquisição. Os equipamentos são:

- Transdutores de pressão;
- Cabos transmissores de sinal;
- Caixa de transição;
- Placa de aquisição;
- Notebook.

Os equipamentos foram calibrados previamente à aquisição, elaborando curvas de calibração para cada transdutor, respeitando suas respectivas faixas de medição. A calibração permitiu converter os sinais elétricos adquiridos durante os ensaios para valores de pressão, em metros de coluna d'água (m.c.a.).

A Figura 35 ilustra as conexões do sistema durante a calibração dos equipamentos.

Figura 35 - Sistema de aquisição de dados



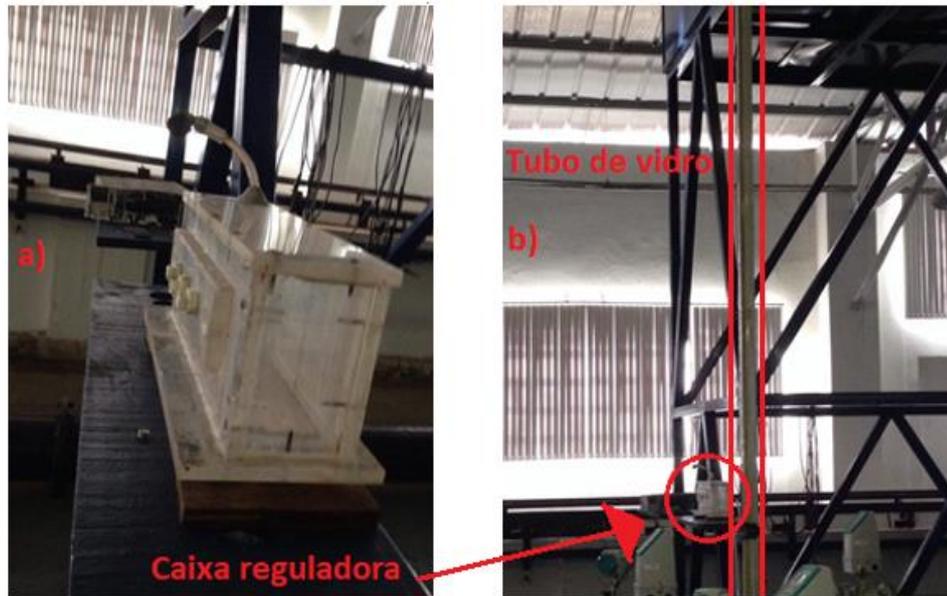
Fonte: Acervo LOH, adaptada pelo autor

Para a calibração, uma tubulação de vidro foi instalada verticalmente, apoiada sobre uma folha milimetrada, ao lado de uma trena métrica. A tubulação de vidro foi conectada a uma caixa acrílica reguladora de pressão por uma mangueira de silicone, em uma altura intermediária da tubulação de vidro.

O processo de calibração consistiu em conectar transdutores na caixa reguladora de pressão, cheia de água, regulando o nível d'água na tubulação de vidro. Medir a diferença de coluna d'água entre o transdutor e o nível na tubulação vertical (m.c.a.) e associar esse valor ao sinal transmitido pelo transdutor. A aquisição de valores possibilitou, através do software Excel, desenvolver uma reta característica para o transdutor.

A Figura 36 mostra em detalhe a caixa reguladora de pressão e a tubulação de vidro.

Figura 36 – a) Detalhe da caixa acrílica e b) conjunto caixa-tubo de vidro



Fonte: Acervo LOH, adaptada pelo autor

## 4.2 CONDIÇÕES DE ENSAIO

Para a aquisição de dados, os transdutores disponíveis no laboratório foram organizados e instalados, de acordo com sua faixa de operação, nos espelhos e patamares da calha do vertedouro, com base nas pressões esperadas para cada região da calha, de acordo com a bibliografia. A Tabela 7 enumera as posições dos transdutores ao longo da calha, nomeando-os de acordo com a marca.

Tabela 7 – localização dos transdutores ao longo da calha

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

Fonte: Acervo LOH, adaptada pelo autor

Onde:

OM = transdutores da marca Ômega;

S e SN = transdutores da marca Sitron;

H = transdutores da marca Hytronic.

Os transdutores foram instalados a 8 mm da quina do degrau, tanto no patamar quanto no espelho, na linha central da calha. Peças “T” de vidro foram utilizadas na conexão entre os

transdutores e os degraus, permitindo a retirada de bolhas de ar próximas à membrana do transdutor, evitando prejuízos na aquisição. A Figura 37 ilustra a conexão dos transdutores. A frequência de aquisição de dados dos transdutores foi de 100 Hz, durante 10 minutos, de 3 a 5 minutos após a confirmação da vazão e demais condições do ensaio.

Figura 37 – Disposição dos transdutores na calha do vertedouro



Fonte: elaborado pelo autor

Nos ensaios, a câmara de ar estava aberta, permitindo a entrada de ar no escoamento, e o defletor estava posicionado no primeiro degrau, configurando um ensaio com aeração induzida.

As vazões de água e os coeficientes  $\beta$  ensaiados estão marcados com “x” na Tabela 8.

Tabela 8 – Combinação de vazão de água e coeficiente  $\beta$  ensaiados

		Vazão (l/s)				
		75	100	150	200	250
Condição de entrada de ar	Aeração induzida Sem soprador	x	x	x	x	x
	Aeração induzida Com soprador $\beta$ 2%	-	-	-	x	x
	Aeração induzida Com soprador $\beta$ 6%	x	x	x	x	x
	Aeração induzida Com soprador $\beta$ 8%	x	x	x	x	x
	Aeração induzida Com soprador $\beta$ 10%	x	x	x	x	x

Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.3 METODOLOGIA ANALÍTICA

As análises visuais perante o modelo e por vídeo permitiram a formação de tabelas contendo os degraus de divisão das regiões, para cada vazão e condição de entrada de ar.

Os dados de pressão por degrau coletados foram separados por vazão, condição de entrada de ar e dispostos em gráficos, de modo a elucidar a distribuição de pressões ao longo da calha para cada combinação de ensaio realizada.

Os valores de pressão e os degraus de divisão das regiões, foram sobrepostos em gráficos, tornando possível relacionar intervalos de valores e comportamentos de pressão para cada região, de acordo com a combinação de ensaio analisada.

Com a intenção de desmembrar as análises, os gráficos de pressão ao longo da calha combinam as vazões ensaiadas, com uma condição de entrada de ar. O mesmo ocorre para uma vazão e todas as condições de entrada de ar, de acordo com a Tabela 9. Tal desmembramento permitiu verificar efeitos separados entre alteração de vazão e alteração de condição de entrada de ar.

Para fins comparativos, as regiões do jato e redução de água preta, semelhantes às regiões percebidas por Novakoski et al. (2019) foram comparadas. O ângulo  $\theta$  entre o defletor e calha, em todos os ensaios, foi  $7,67^\circ$ . Os comprimentos de referência foram calculados a

partir dos valores demonstrados na Tabela 9. O número de Froude foi calculado para cada vazão ensaiada, pela fórmula do número de Froude, expressa pela Equação 25.

$$F_r = \frac{V_0}{(h_0 * g)^{1/2}} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

$F_r$  = Número de Froude (adimensional);

$V_0$  = Velocidade média no fim da ogiva (m/s);

$h_0$  = Altura perpendicular da lâmina d'água no fim da ogiva (m);

$g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

A altura da lâmina d'água, perpendicular a calha, no final da ogiva ( $h_0$ ) foi calculada pelo princípio de conservação de energia entre a crista e o final da ogiva, desprezando a perda de carga (Equação 26), associadas pela equação da continuidade (Equação 27). O subíndice 1 está associado à crista da ogiva, enquanto o subíndice 0 está associado ao fim da ogiva.

$$H_1 = H_0 = z_0 + \frac{V_0^2}{2 * g} + hv * \cos^2 \alpha \quad \text{Equação 26}$$

$$Q_1 = Q_0 = h_0 * B * V_0 \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

$H_1$  e  $H_0$  = Energia total na crista e no fim da ogiva, respectivamente (m);

$z_0$  = Altura do fim da ogiva em relação a um referencial (m);

$g$  = Aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$hv$  = Altura vertical da lâmina d'água no fim da ogiva (m);

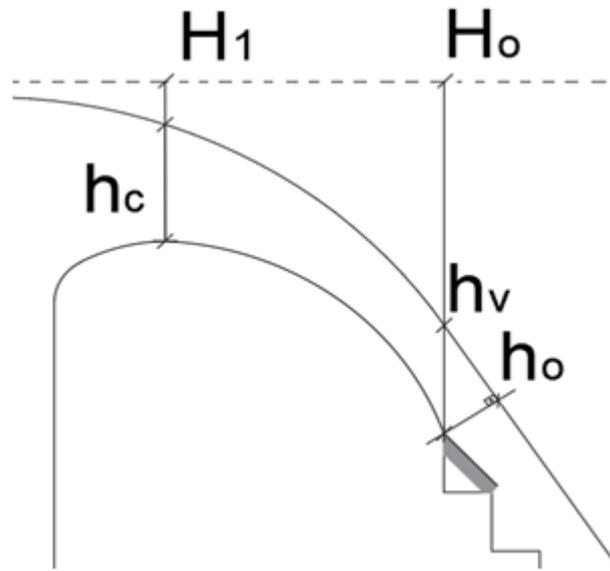
$\alpha$  = Ângulo de inclinação da calha com a horizontal (°);

$Q_1$  e  $Q_0$  = Vazão na crista e no fim da ogiva, respectivamente (m<sup>3</sup>/s);

$B$  = Largura da calha do vertedouro (m);

A Figura 38 ilustra os parâmetros utilizados nos cálculos da Equação 26 e da Equação 27.

Figura 38 – Parâmetros da equação do princípio de conservação da energia



Fonte: elaborado pelo autor.

Por geometria, o valor de  $h_0$  foi determinado a partir de  $h_v$ .

## 5 RESULTADOS DA PESQUISA

Os resultados da pesquisa são apresentados na sequência do texto, divididos entre análise e caracterização das regiões do escoamento e pressões ao longo da calha, resultados qualitativos (definição de características, por vezes subjetivas) e resultados quantitativos (valores geralmente tratados de forma estatística), respectivamente.

### 5.1 RESULTADOS QUALITATIVOS

Para a análise, foram definidas 5 regiões do escoamento: (1) Escoamento sobre ogiva e defletor; (2) Jato; (3) Impacto do jato e desenvolvimento da aeração inferior; (4) Zona de transição; (5) Escoamento uniforme.

A definição das regiões foi realizada a partir da visualização do escoamento, no modelo físico localizado no LOH-IPH-UFRGS, e através de fotos e vídeos adquiridos pela equipe do laboratório. Os pontos de separação das regiões são: 1-2 Descolamento do escoamento, proporcionado pelo defletor, formando o jato; 2-3 Impacto do jato; 3-4 Encontro da aeração inferior e aeração superior; 4-5 Fim dos focos água preta.

Água branca é caracterizada por ter coloração esbranquiçada, indicando presença de bolhas de ar.

### 5.1.1 ESCOAMENTO SOBRE OGIVA E DEFLETOR

Durante o deslocamento do fluxo pela ogiva, o escoamento vindo do reservatório passa do regime subcrítico ao regime supercrítico, através de um remanso. Nesta região, a interface água/ar é bem definida, indicando pouca ou nenhuma entrada de ar superior. No primeiro degrau, devido à presença do defletor, o escoamento muda levemente de direção, sendo afastado da calha. Ao longo de toda a região, apenas água preta é visível. Na Figura 39 pode-se perceber o comportamento descrito.

Figura 39 - Escoamento sobre ogiva para vazão de 150 l/s.

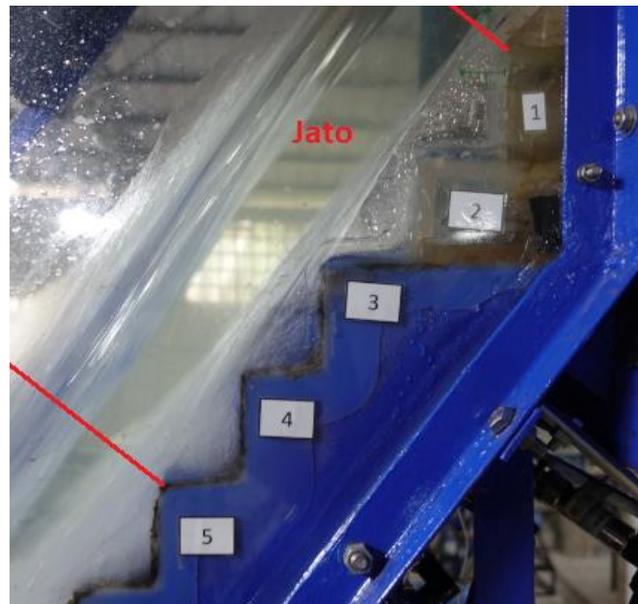


Fonte: acervo LOH.

### 5.1.2 O JATO

O término do defletor gera um descolamento imediato do escoamento em relação à calha, proporcionando uma interface água/ar na camada inferior, antes em contato com a ogiva. Abaixo do jato se encontra um volume de ar, fornecido pela câmara de ar, localizada no espelho do degrau imediatamente abaixo do defletor. Ao longo do jato se identifica o início da entrada de ar pela camada superior e inferior, representada pela presença de água branca. A Figura 40 demonstra a região citada.

Figura 40 – Jato formado pelo descolamento do escoamento com a calha, para vazão de 150 l/s.

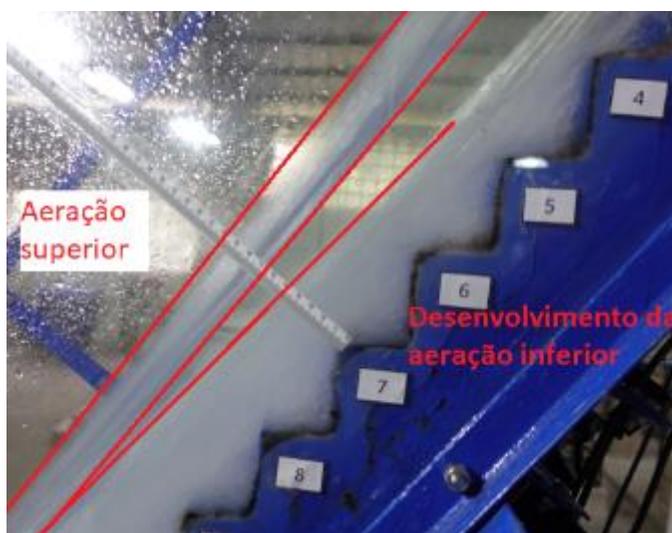


Fonte: acervo LOH.

### 5.1.3 IMPACTO DO JATO E DESENVOLVIMENTO DA AERAÇÃO INFERIOR

O impacto do jato inicia no ponto em que o escoamento entra em contato com a calha em degraus. A partir do impacto do jato, entre o patamar e o espelho de cada degrau, o desenvolvimento da água branca na camada inferior do escoamento gera vórtices. Essa água branca aumenta de espessura gradualmente, em direção a interface água/ar superior do escoamento. Durante essa região, também se desenvolve a presença de água branca na camada superior, ainda com o domínio da água preta nesta camada. No ponto onde a água branca inferior encontra a água branca superior, mencionada anteriormente, termina a região (3). É possível visualizar uma nítida separação entre a água branca e a água preta através da Figura 41.

Figura 41 – Região de impacto do jato e desenvolvimento da aeração inferior, para vazão de 150 l/s

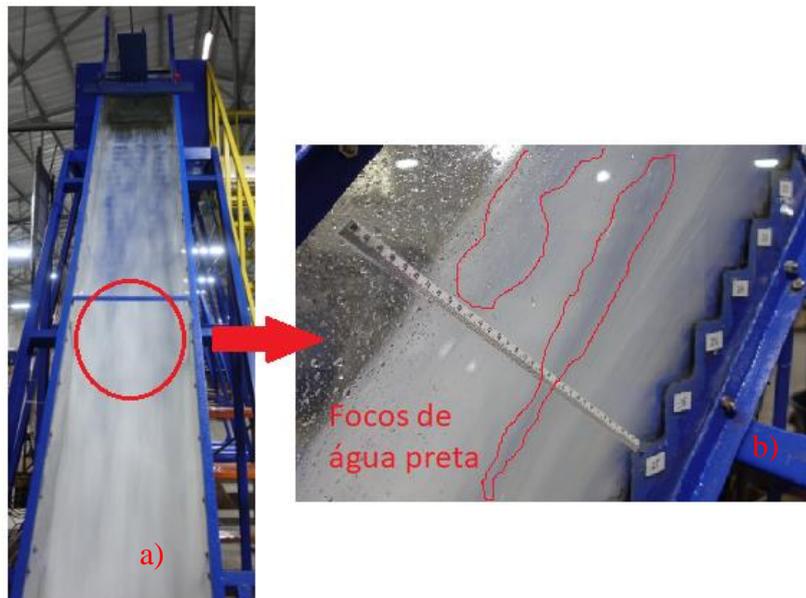


Fonte: acervo LOH.

### 5.1.4 ZONA DE TRANSIÇÃO

Com o fim da região (3), aumenta a proporção da água branca, ainda coexistindo com focos de água preta. Ao longo da região, a proporção segue aumentando, até o momento em que não é mais possível identificar focos de água preta no escoamento, encerrando a região (4). Nesta região, não existe separação nítida entre água branca e água preta. A Figura 42 ilustra a zona de transição.

Figura 42 – Zona de transição na vazão de 150 l/s: (a) vista frontal do escoamento e (b) vista inclinada.



Fonte: acervo LOH.

### 5.1.5 ESCOAMENTO UNIFORME

A água preta deixa de ser visível e o escoamento, tanto em vista lateral quanto em vista frontal, aparenta ser formado apenas por água branca. A Figura 43 ilustra a região de escoamento uniforme.

Figura 43 – Demonstração da região de escoamento uniforme para vazão de 150 l/s



Fonte: Acervo LOH

## 5.2 RESULTADOS QUANTITATIVOS

Os resultados quantitativos englobam todas as medições instrumentalizadas no modelo físico, além das aferições visuais de alguns parâmetros.

### 5.2.1 DEGRAU DE SEPARAÇÃO DAS REGIÕES

A primeira quantificação dos resultados foi a elaboração da Tabela 9, para cada condição de ensaio, de acordo com a descrição qualitativa apresentada anteriormente. Os resultados apresentados foram adquiridos por análise visual, identificando o degrau que caracteriza a separação das regiões. Foi detectada oscilação na posição de separação das regiões durante os ensaios.

---

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO EM VERTEDOURO EM DEGRAUS DE INCLINAÇÃO 1V :  
0,75H COM AERAÇÃO INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR

Tabela 9 – Degrau de separação de regiões de acordo com as condições de ensaio

Divisão do escoamento					
Regiões do escoamento	Vazão	75 l/s			
	$\beta$	5,8%*	6%	8%	10%
	1--2	1	1	1	1
	2--3	6	6	6	7
	3--4	14	12	11	13
	4--5	20	20	18	17

Regiões do escoamento	Vazão	100 l/s			
	$\beta$	3,6%*	6%	8%	10%
	1--2	1	1	1	1
	2--3	5	6	6	6
	3--4	12	12	13	13
	4--5	18	18	19	19

Regiões do escoamento	Vazão	150 l/s			
	$\beta$	2,4%*	6%	8%	10%
	1--2	1	1	1	1
	2--3	5	7	7	7
	3--4	16	18	14	13
	4--5	28	24	28	26

Regiões do escoamento	Vazão	200 l/s				
	$\beta$	1,4%*	2%	6%	8%	10%
	1--2	1	1	-	1	1
	2--3	5	5	-	7	7
	3--4	23	22	-	19	18
	4--5	34	37	-	30	29

Regiões do escoamento	Vazão	250 l/s				
	$\beta$	1,3%*	2%	6%	8%	10%
	1--2	1	1	1	1	1
	2--3	4	5	6	6	7
	3--4	27	28	29	27	25
	4--5	37	39	38	37	35

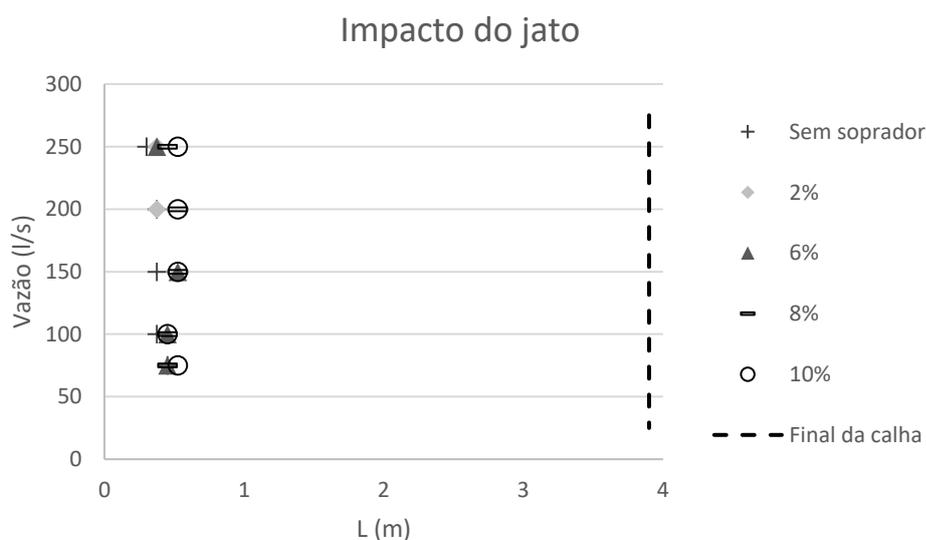
\*Entrada de ar sem utilização de soprador

Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados da Tabela 9 demonstram a posição onde se identifica a separação das zonas, em função das vazões e condição de entrada de ar analisadas. O ensaio com vazão 200 l/s e  $\beta$  6% foi descartado devido a problemas nas imagens.

A partir da Tabela 9, gráficos de vazão por comprimento de calha a partir do fim da ogiva (L) foram gerados e analisados, facilitando o entendimento da separação das regiões. A divisão entre a região 1 e 2, determinada pelo degrau de descolamento do escoamento, não varia em nenhuma combinação de ensaio, visto que o critério de separação é geométrico. Por esse motivo, nenhuma análise mostrou-se necessária para essa separação de regiões. A Figura 44 ilustra a posição L (m) na calha de separação das regiões 2 e 3, determinada pelo impacto do jato.

Figura 44 – Separação entre regiões 2 e 3, para cada vazão e cada condição de entrada de ar

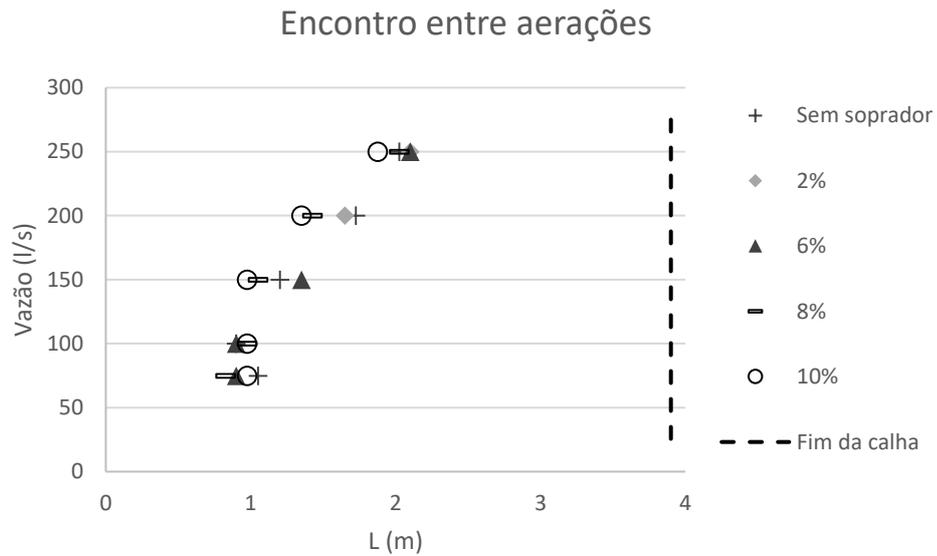


Fonte: elaborado pelo autor.

Nenhuma alteração significativa entre o degrau de impacto do jato pode ser percebida, nem pela variação das vazões, nem pela variação das condições de entrada de ar. A alternância entre os valores fica muito próxima da variação do fenômeno, de um degrau a montante e um degrau a jusante.

Para a separação entre as regiões 3 e 4, definida pelo encontro entre aeração inferior e aeração superior, a Figura 45 ilustra os valores determinados.

Figura 45 - Separação entre regiões 3 e 4, para cada vazão e cada condição de entrada de ar

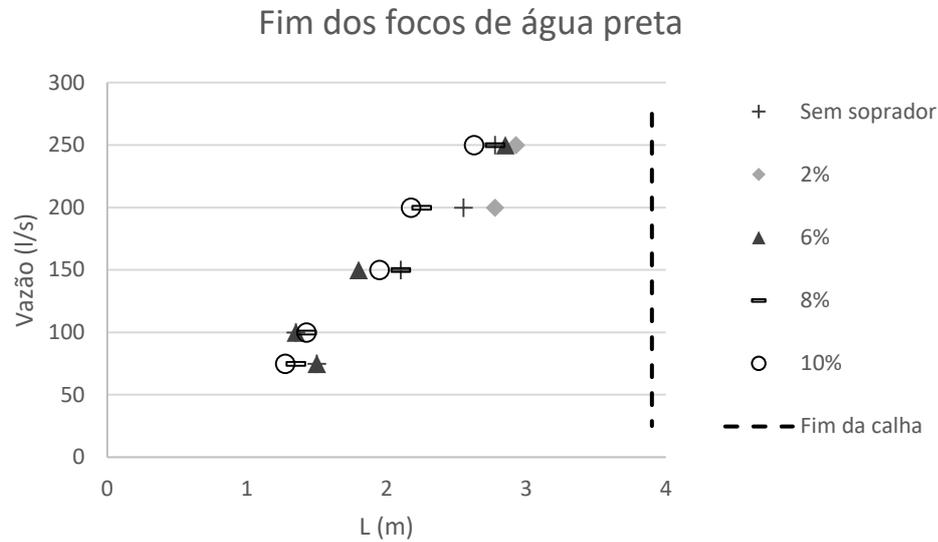


Fonte: elaborado pelo autor.

A dispersão dos valores demonstra avanço para montante do encontro entre aerações, com aumento de vazão a partir de 150 l/s. A influência de condição de entrada de ar não apresentou uma tendência nítida.

Com o fim dos focos de água preta, a divisão entre as regiões 4 e 5 foi determinada, como demonstra a Figura 46.

Figura 46 - Separação entre regiões 4 e 5, para cada vazão e cada condição de entrada de ar



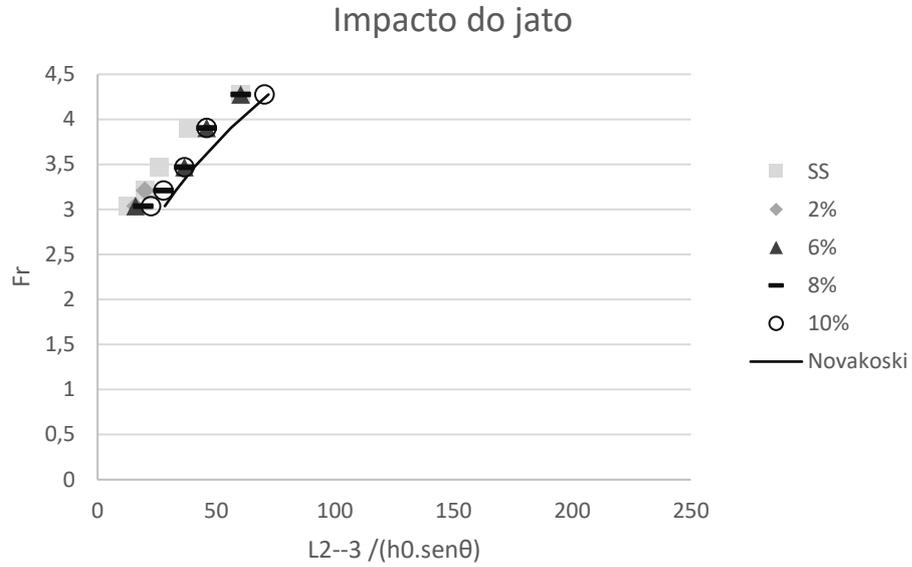
Fonte: elaborado pelo autor.

A dispersão dos valores demonstra avanço para montante do fim dos volumes de água preta, com aumento de vazão. A influência de condição de entrada de ar não foi relevante.

Os comprimentos de impacto do jato e de encontro entre aerações, para cada vazão ensaiada e cada condição de entrada de ar foram comparados com a equação proposta por Novakoski et al. (2019).

Os gráficos comparativos estão apresentados na Figura 47 e na Figura 48.

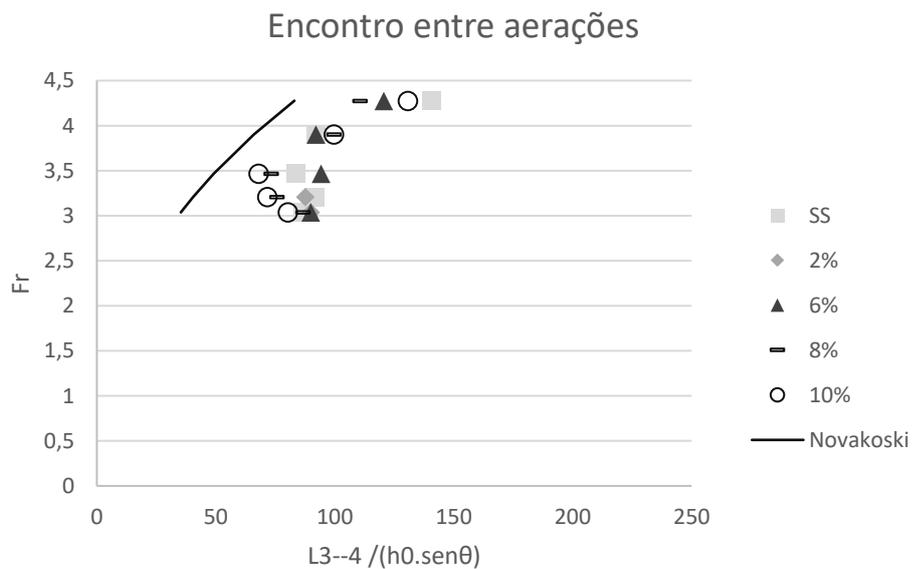
Figura 47 – Gráfico adimensional do impacto do jato



Fonte: elaborado pelo autor.

Os valores de impacto do jato encontrados, independente da condição de entrada de ar, se aproximam da curva proposta por Novakoski et al. (2019). A condição de entrada de ar não exerce influência perceptível pelos gráficos adimensionais.

Figura 48 – Gráfico adimensional do encontro entre aerações



Fonte: elaborado pelo autor.

O gráfico adimensional do encontro de aerações ilustra diferença entre os valores encontrados pela presente pesquisa e por Novakoski et al. (2019). Tal diferença, em termos de degrau de ocorrência, está próxima da oscilação natural do fenômeno (entre dois e três degraus). É importante salientar, como dificuldade na determinação do degrau de ocorrência, a oscilação natural do fenômeno. Cada modelo possui um tamanho diferente de degrau e os ensaios utilizaram diferentes números de Froude. Referências diferentes em relação ao ponto exato do fim da água preta podem ter sido usadas pelos pesquisadores para determinação do degrau. Não foi notada tendência da condição de entrada de ar na dispersão dos valores do encontro entre aerações.

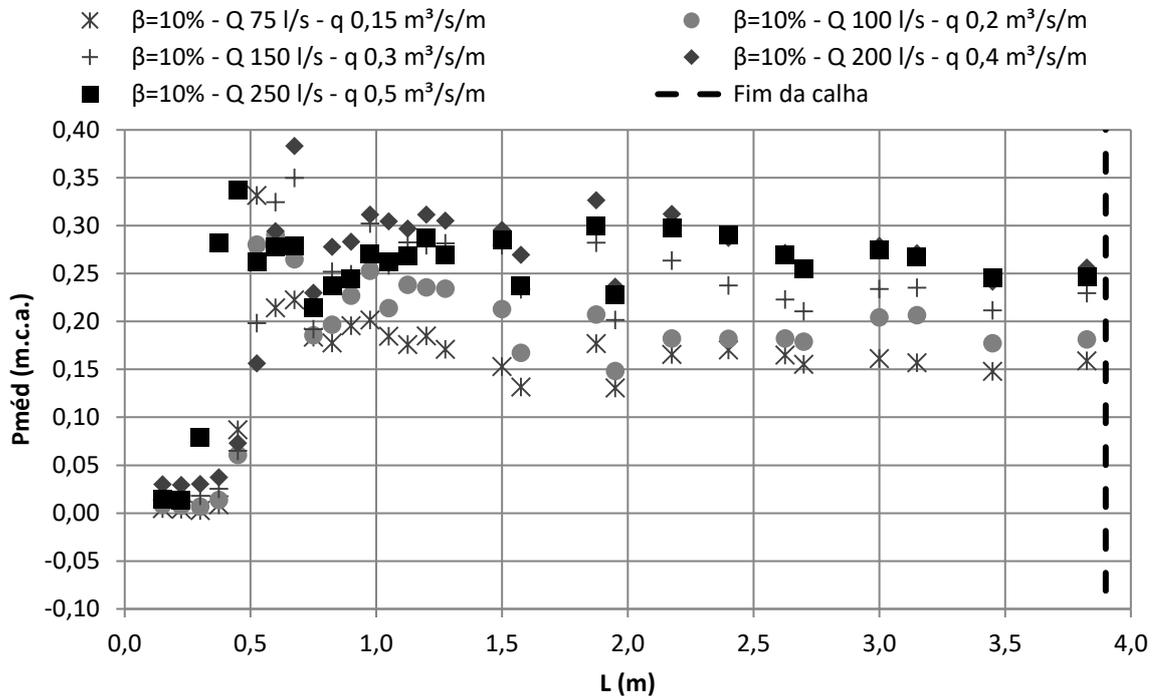
As demais regiões, determinadas na presente pesquisa e por Novakoski et al. (2019), são caracterizadas de forma diferente, não sendo válidas demais comparações.

## 5.2.2 PRESSÕES

Os transdutores de pressão instalados nas quinas dos degraus foram responsáveis pela aquisição dos dados utilizados neste trabalho. As pressões positivas no patamar e as pressões negativas no espelho, majoritariamente, refletem uma tendência de arrancamento da quina do degrau por parte do escoamento.

Como esperado, o efeito do defletor impede o contato do escoamento com os degraus imediatamente a jusante da peça, mantendo os valores de pressão aproximadamente iguais a pressão na câmara de ar (pressão atmosférica). Com o impacto do jato, as médias de pressão atingem, para todas as vazões ensaiadas, seus valores máximos, tanto no patamar quanto no espelho. O maior esforço na calha, analisando o patamar, ocorre no degrau de impacto do jato, com efeito significativo até 2 degraus a jusante. A Figura 49 ilustra a dispersão de valores de pressão média no patamar dos degraus, para diferentes vazões, com aeração induzida  $\beta 10\%$ . Os ensaios com diferentes valores de  $\beta$  possuem o mesmo comportamento.

Figura 49 – Pressões médias nos patamares com aeração induzida  $\beta$  10% para diversas vazões

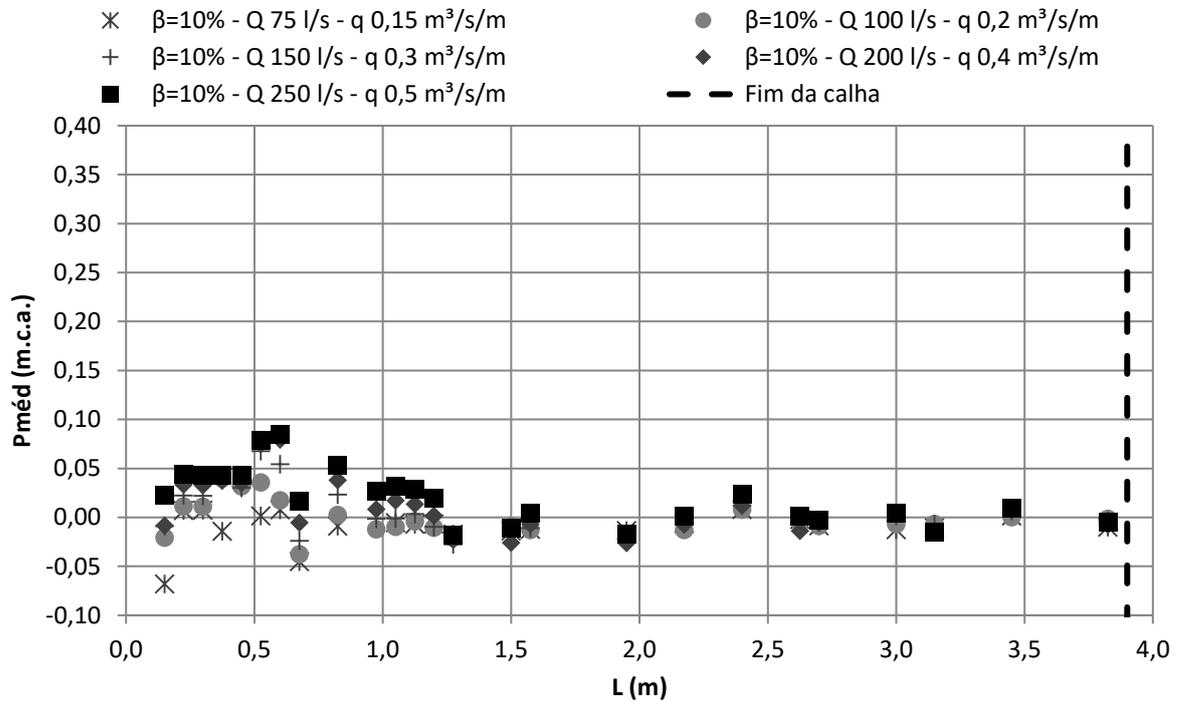


Fonte: elaborado pelo autor.

A partir dos degraus sob efeito do impacto do jato, as pressões decrescem e, a jusante de  $L = 1$  m, quanto maior a vazão, maior a pressão média nos patamares, excluindo a vazão de 200 l/s, que em diversos ensaios assumiu os maiores valores de pressão.

As pressões médias, para cada vazão ensaiada, tendem a um valor uniforme. Maiores vazões tendem a atingir o valor uniforme mais a jusante, em comparação com menores vazões. A Figura 50 ilustra a dispersão de valores de pressão média no espelho dos degraus para diferentes vazões, com aeração induzida  $\beta = 10\%$ . Os ensaios com diferentes valores de  $\beta$  possuem o mesmo comportamento.

Figura 50 – Pressões médias nos espelhos com aeração induzida  $\beta$  10% para diversas vazões

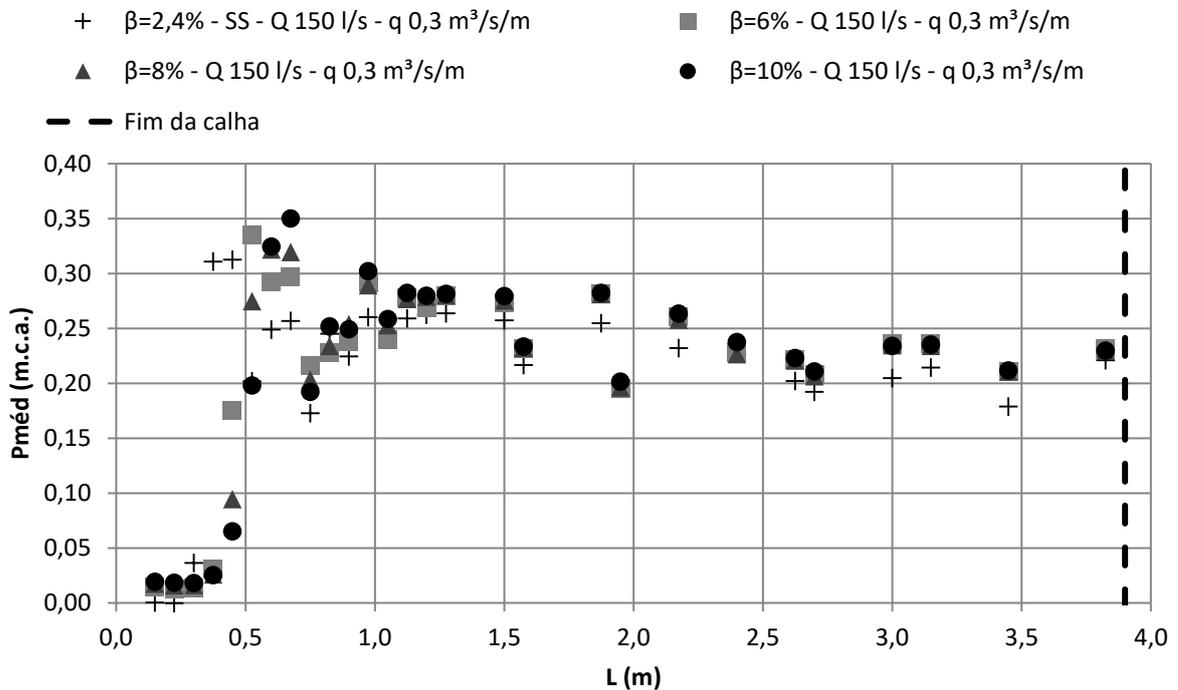


Fonte: elaborado pelo autor.

Nos espelhos, as pressões médias possuem valores entre -0,05 e 0,15 m.c.a. e as características de distribuição de pressões médias são muito semelhantes ao patamar. Os primeiros degraus não estão em contato com o escoamento, o impacto do jato causa o maior esforço na calha e alguns degraus após o impacto, os valores de pressão média tendem a um valor uniforme. A partir de  $L = 1,5$  m, as pressões médias nos espelhos não demonstram variação significativa entre as vazões.

Com a Figura 51 conseguimos visualizar os valores de pressão média nos patamares para a vazão de 150 l/s, com diferentes condições de entrada de ar. Os demais gráficos de pressão média nos patamares, para cada vazão e diferentes condições de entrada de ar estão no apêndice.

Figura 51 - Pressões médias nos patamares para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar

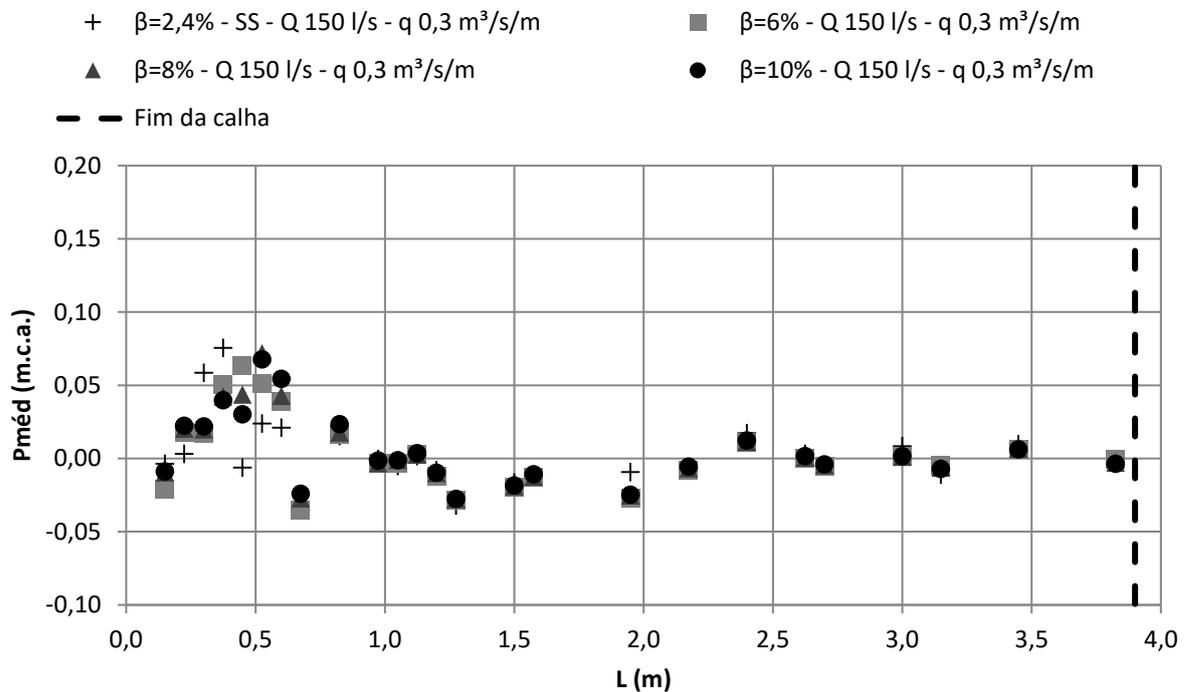


Fonte: elaborado pelo autor.

Comparando graficamente os valores de pressão média com vazão de 150 l/s e aeração induzida com diferentes valores de  $\beta$ , é perceptível que o comportamento das pressões médias, a jusante de  $L = 0,75$  m, é similar. É possível identificar uma diferença entre os degraus onde ocorre o pico de pressão de cada ensaio, indicando uma relação com fator  $\beta$ . Quando maior o  $\beta$ , mais a jusante se encontra o pico de pressão média.

Na Figura 52 conseguimos visualizar os valores de pressão média nos espelhos para a vazão de 150 l/s, com diferentes condições de entrada de ar. Os gráficos de pressão média nos espelhos, para cada vazão e diferentes condições de entrada de ar se encontram no apêndice do trabalho.

Figura 52 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar

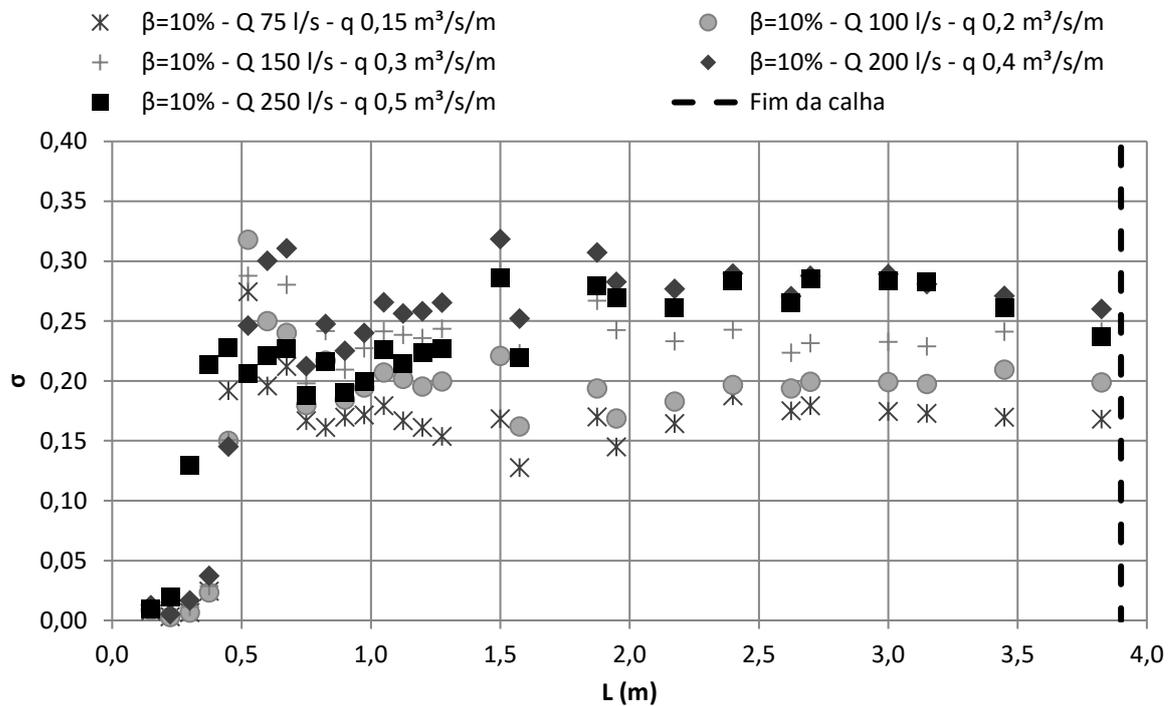


Fonte: elaborado pelo autor.

Assim como nos patamares, a região da calha próxima ao jato apresenta os maiores valores de pressão média. Para medições nos espelhos com vazão de 150 l/s,  $\beta$  tem influência no degrau de pico de pressão. Tal influência não se repete para todos os espelhos. A partir de  $L = 0,75$  m, não é possível diferenciar as condições de entrada de ar.

Os valores de desvio padrão no patamar com aeração induzida ensaios com aeração induzida  $\beta$  10% estão apresentados na Figura 53. Os demais gráficos, com diferentes valores de  $\beta$ , possuem o mesmo comportamento.

Figura 53 – Valores de desvio padrão no patamar com aeração induzida  $\beta$  10% para diversas vazões

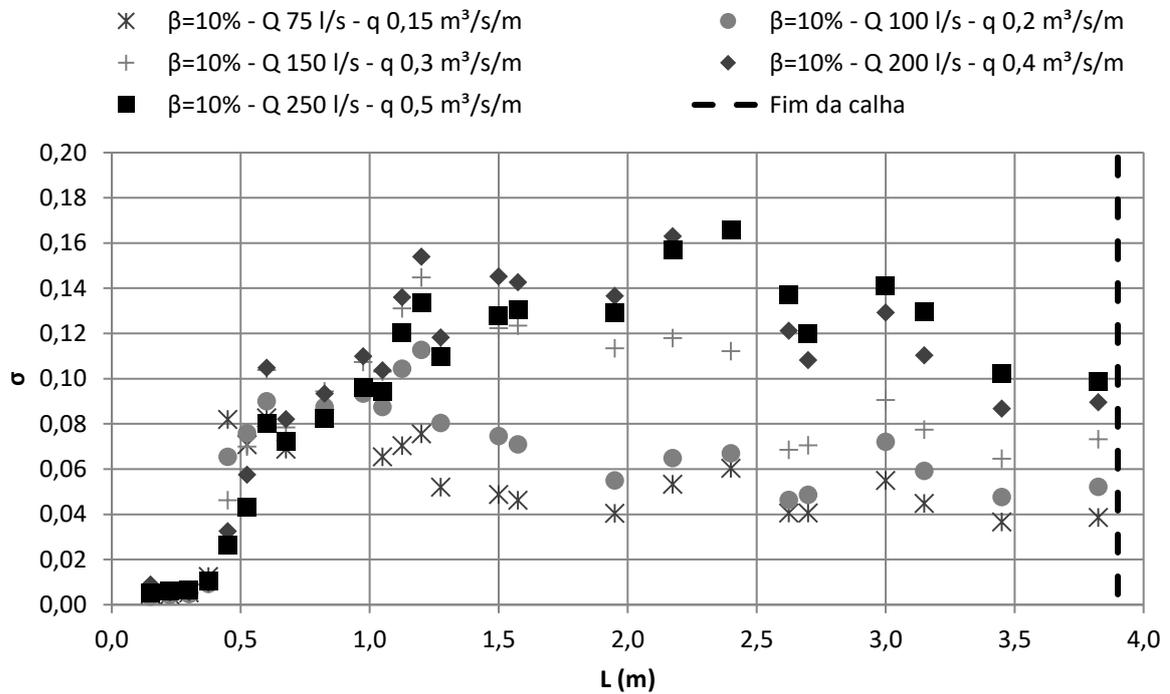


Fonte: elaborado pelo autor.

Nos patamares, os valores de desvio padrão estão próximos a zero nos degraus onde o escoamento não está em contato com a calha, formam um pico nos degraus próximos ao impacto do jato, e decrescem até um valor uniforme, independentemente da quantidade de ar entrando pela câmara. A vazão de 250 l/s não possui seu máximo valor de pressão na região de impacto do jato.

Para representar os valores de desvio padrão com  $\beta = 10\%$  nos espelhos, foi elaborada a Figura 54.

Figura 54 – Valores de desvio padrão no espelho com aeração induzida  $\beta$  10% para diversas vazões

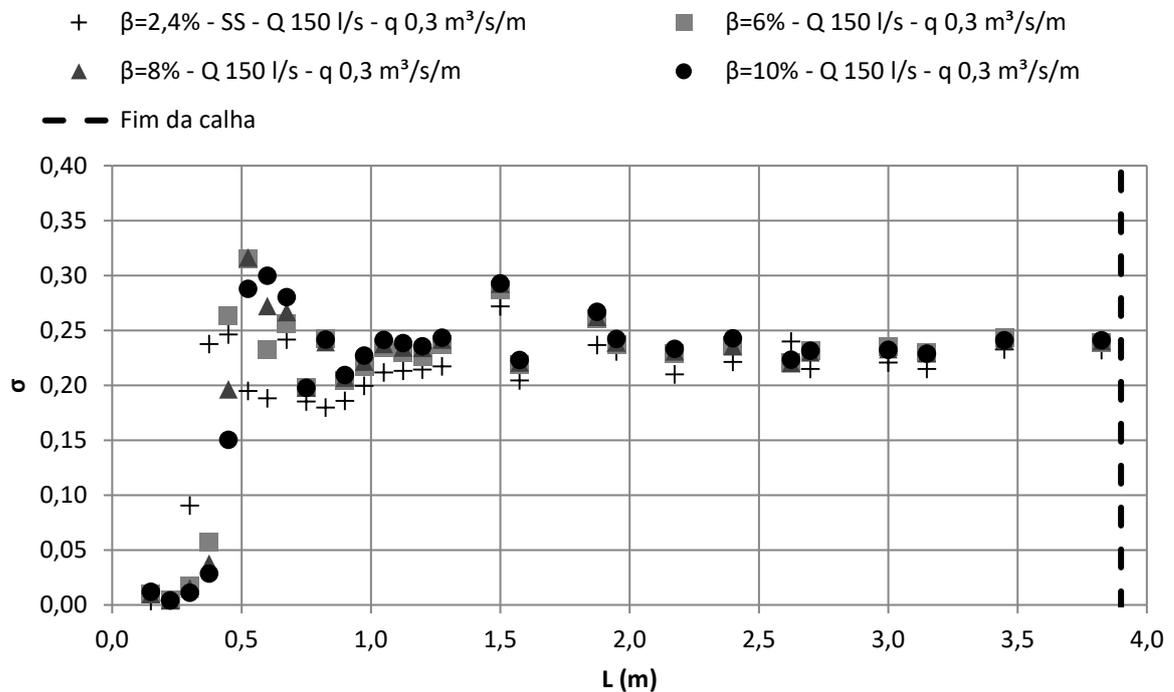


Fonte: elaborado pelo autor.

Nos espelhos, os degraus onde o escoamento está descolado da calha possuem valores de desvio padrão próximos a zero, aumentando gradualmente até um valor máximo e decrescem até um valor uniforme, deferente para cada vazão. Maiores vazões tendem a atingir o valor uniforme mais a montante, em comparação com menores vazões.

A dispersão de desvio padrão no patamar para uma vazão de 150 l/s e diversas entradas de ar é ilustrado pela Figura 55.

Figura 55 - Valores de desvio padrão no patamar para vazão de 150 l/s e diversas condições de entrada de ar

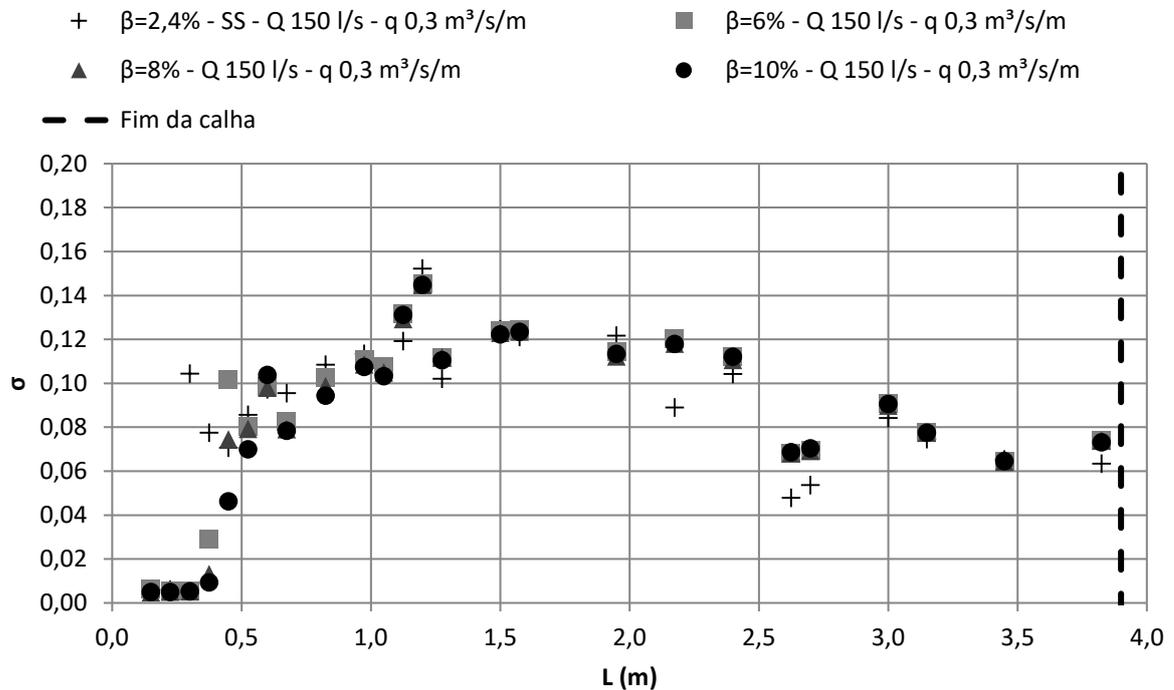


Fonte: elaborado pelo autor

É possível notar a formação de um pico nos degraus próximos ao impacto do jato. As séries de dados não demonstram nenhuma alteração significativa em seu comportamento, independente dos valores de  $\beta$ . Os demais gráficos de desvio padrão no patamar, com diferentes valores de  $\beta$  possuem o mesmo comportamento e estão dispostos no apêndice.

A dispersão de desvio padrão no espelho para uma vazão de 150 l/s e diversas entradas de ar é ilustrado pela Figura 56.

Figura 56 - Valores de desvio padrão no espelho para vazão de 150 l/s e diversas condições de entrada de ar



Fonte: elaborado pelo autor

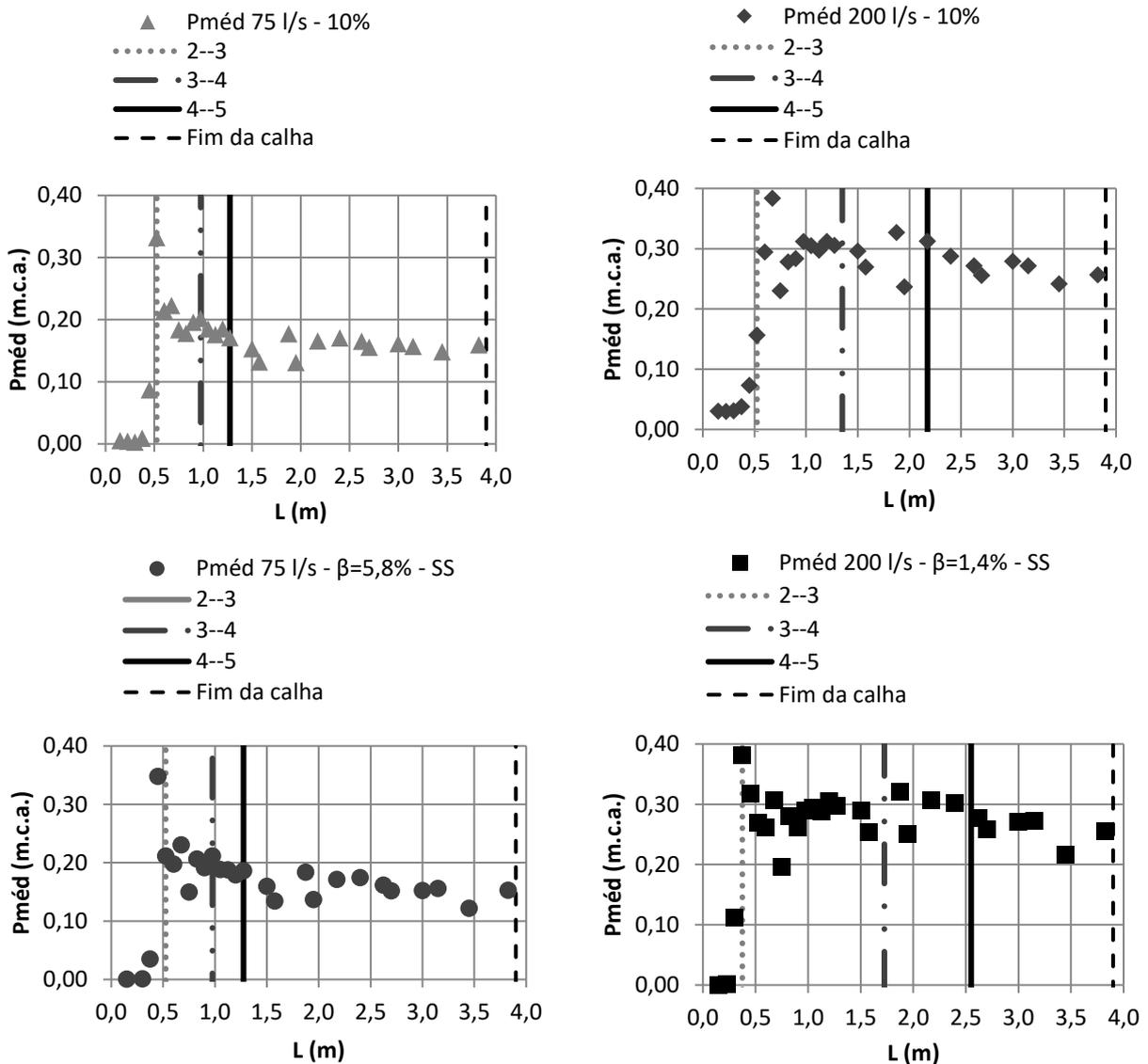
Os valores máximos encontrados na Figura 56 não coincidem com o impacto do jato mesmo que a diferença entre os valores seja pequena. É possível notar uma tendência das séries com menores  $\beta$  possuírem valores de desvio padrão referentes ao impacto do jato (entre  $L = 0,3$  e  $L = 0,6$ ) a montante, comparando com maiores valores de  $\beta$ . Para os gráficos de desvio padrão no espelho das demais vazões, com diferentes  $\beta$ , o comportamento é o mesmo. Os gráficos estão disponíveis no apêndice.

Combinando os dados de pressão com os dados gerados pela análise visual do escoamento, foi possível elaborar gráficos de pressões médias ao longo da calha, com as divisões de região representadas por linhas verticais.

As marcações de separação de região facilitam a visualização de comportamentos já analisados. As pressões na calha antes do impacto do jato são aproximadamente iguais a pressão atmosférica. A região da calha do degrau de impacto do jato, com influência de dois degraus a jusante, (lembrando da oscilação desse fenômeno, de um degrau a montante e um degrau a jusante) recebe os maiores esforços de pressão, tanto no patamar, quanto no espelho,

independente da vazão e da condição de entrada de ar. A Figura 57 exemplifica as pressões médias separadas por regiões em 4 combinações entre vazão e condição de entrada de ar para os patamares.

Figura 57 – Pressões médias de 75 e 200 l/s para  $\beta$  10% ensaio sem soprador com separação das regiões 2, 3, 4 e 5 no patamar

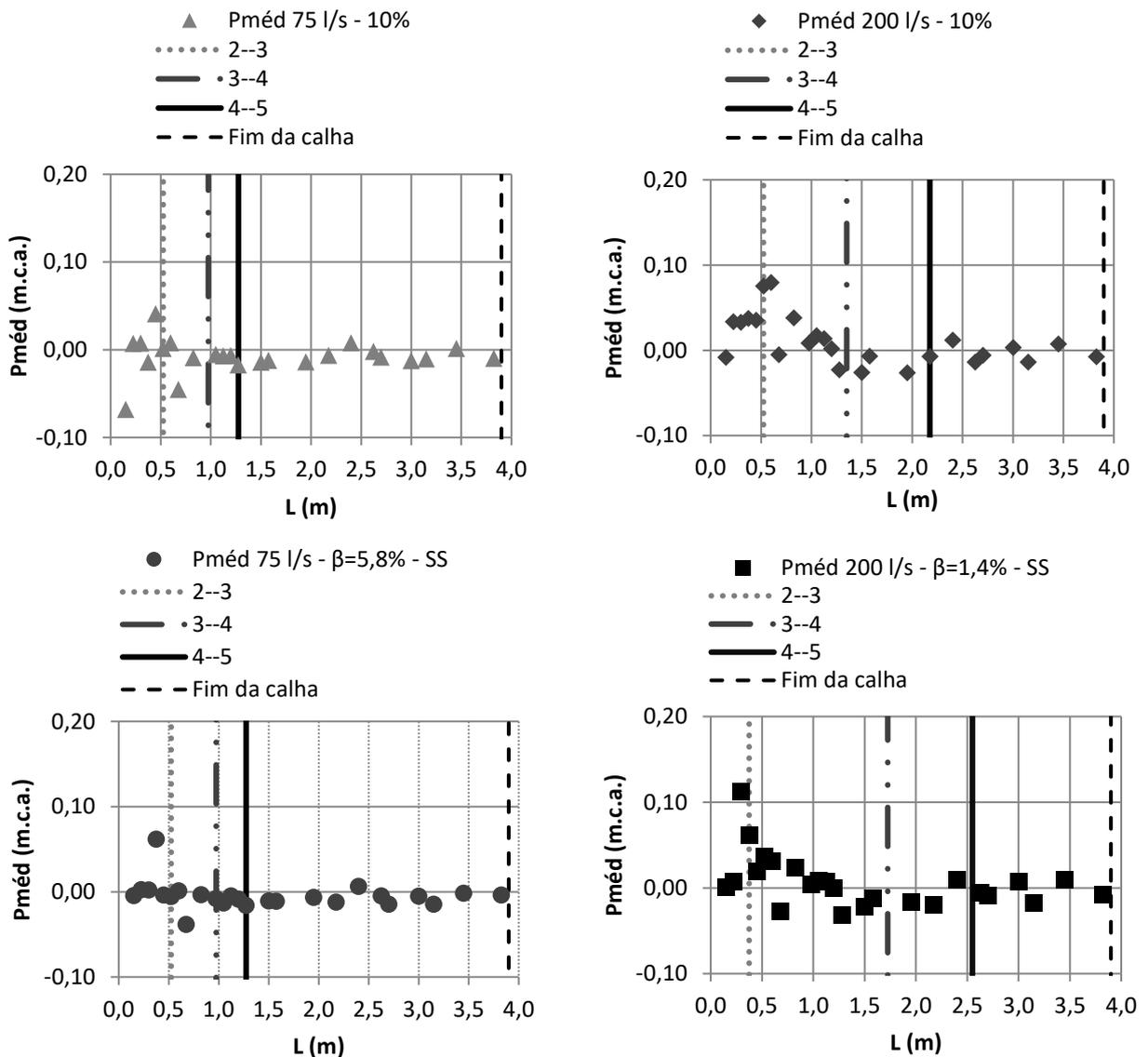


Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados de pressões na região 5 oscilam em torno do valor de pressão uniforme de cada combinação ensaiada.

Para os espelhos, a visualização das regiões nos gráficos de pressão reforçou as características em semelhança com os patamares, conforme ilustra a Figura 58.

Figura 58 – Pressões médias de 75 e 200 l/s para  $\beta$  10% ensaio sem soprador com separação das regiões 2, 3, 4 e 5 no espelho



Fonte: elaborado pelo autor.

Os primeiros degraus não estão em contato com o escoamento, o impacto do jato causa o maior esforço na calha e, alguns degraus após o impacto, os valores de pressão média tendem a um valor uniforme.

## 6 CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados, é possível dividir o presente capítulo em conclusões quanto às regiões determinadas e conclusões quanto às pressões ao longo da calha.

### 6.1 CONCLUSÕES QUANTO ÀS REGIÕES DETERMINADAS

As regiões delimitadas no presente trabalho foram determinadas de forma a abranger todo o escoamento sobre o vertedouro. A oscilação dos pontos de separação de região não impede que a sequência das regiões ao longo da calha permaneça sempre a mesma.

Diferentes condições de entrada de ar não demonstram variação conclusiva nas características e nas localizações das regiões analisadas. Comparativamente, maiores vazões deslocam para jusante a ocorrência de alguns fenômenos analisados. A aeração inferior finaliza seu desenvolvimento mais a jusante, quanto maior a vazão. O fim das dispersões de água preta também é influenciado da mesma forma. O impacto do jato não é afetado significativamente pela alteração de vazão.

As diferentes condições de entrada de ar no escoamento não interferem de maneira relevante para a determinação dos pontos de mudança de região.

A comparação entre as posições de impacto do jato encontrados e a curva proposta por Novakoski et al. (2019) demonstrou que a dispersão de valores pode ser representada pela equação.

Para a comparação entre as posições do fim da água preta com a equação de Novakoski et al. (2019), a dispersão de valores demonstrou diferenças significativas. Quando tratadas em termos de degrau de ocorrência, as diferenças entre os resultados ficam dentro do intervalo de degraus de oscilação do fenômeno (dois a três degraus). A oscilação natural e referências diferentes do fenômeno podem ter sido abordadas de forma discordante. O tamanho dos degraus utilizados em cada ensaio não foi o mesmo, além de diferentes números de Froude utilizados nos ensaios.

## 6.2 CONCLUSÕES QUANTO ÀS PRESSÕES AO LONGO DA CALHA

A partir das dispersões de pressão média, é possível determinar a região do jato, bem como o ponto de impacto do jato na calha. Abaixo do jato, os degraus estão submetidos a valores de pressão próximos à pressão atmosférica, precedidos dos degraus com maiores pressões médias atuantes sobre a calha, tanto para o patamar, quanto para o espelho, independente da condição de entrada de ar no escoamento. As demais divisões de regiões não podem ser delimitadas apenas pelas pressões.

Diferentes condições de entrada de ar não apresentam variação conclusiva nos valores de pressões médias ao longo da calha. Existe uma tendência de que séries com maiores  $\beta$  possuam seus valores de pico mais a jusante, em comparação com séries de menores  $\beta$ , mesmo que tal influência não seja relevante para as delimitações das regiões. Tal tendência é nítida em aproximadamente metade dos ensaios.

Comparativamente, maiores vazões intensificam as pressões médias ao longo da calha.

Para os patamares, os valores de pressão média estão entre 0 e 0,4 m.c.a. Nos espelhos, os valores são compreendidos pelo intervalo entre -0,05 e 0,12 m.c.a.

Analisando as dispersões de desvio padrão, os valores máximos deixam de ocorrer na região do jato, a partir da vazão de 100 l/s para os espelhos, e a partir da vazão de 200 l/s para os patamares, dificultando identificar a região a partir dos desvios. Durante o jato, os desvios, em semelhança às pressões na região, possuem valores próximos a zero.

Maiores vazões tendem a atingir um valor uniforme mais a jusante, em comparação com vazões menores, e resultam em valores de desvio padrão mais intensos a partir de  $L=1,5$ , independente da condição de entrada de ar.

Os valores de desvio padrão estão entre 0 e 0,34, para os patamares, e são compreendidos pelo intervalo entre 0 e 0,18, para os espelhos.

A caracterização das pressões médias e desvios padrão ao longo da calha serve como base para novas pesquisas relacionadas a pressões instantâneas e flutuações de pressão, vinculadas a potenciais eventos de cavitação e erosão, em vertedouros em degraus com aeração induzida por defletor e câmara de ar.

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Amador, A. T. (2005). *Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalondos en presa de hormigón compactado*. Universidade Politécnic da Catalunha, Barcelona.
- Arantes, E. J. (2007). *Caracterização do escoamento sobre vertedouro em degraus via CFD*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- Chanson, H. (1994). Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. *Journal of Hydraulic Research*, pp. p. 445-460.
- Chanson, H. (1995). History of stepped channels and spillways: a rediscovery of the "wheel".
- Conterato, E. (2011). *Escoamento sobre vertedouro em degraus com declividade 1V : 0,75H : Caracterização das pressões e condições de aeração*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Conterato, E. (2014). *Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Dai Prá, M. (2004). *Características do escoamento sobre vertedouro em degraus de declividade 1V:1H*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Gomes, J. F. (2006). *Campo de pressões: condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V : 0,75H*. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Matos, J. d. (1990). *O Arejamento como medida de protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas*. Tese de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Novakoski, C. K. (2016). *Análise da distribuição longitudinal das pressões em um ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro em degraus*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Novakoski, C. K., Ferla, R., Dai Prá, M., Canellas, A. C., & Marques, M. G. (2019). STEPPED SPILLWAY WITH DEFLECTOR PRE-AERATION: FLOW CHARACTERISTICS. ABRH, No prelo.
- Peterka, A. J. (1953). *The effect of entrained air on cavitation pitting*. Bureau of Reclamation. Denver: IAHR.
- Pfister, M., Hanger, W. H., & Minor, H.-E. (August de 2006). Botton aeration of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, pp. p. 850-853.
- Quintela, A., & Ramos, A. (1980). *Protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- Russell, S., & Sheehan, G. (1974). *Effect of entrained air on cavitation damage*. University of British Columbia, Department of Civil Engineering, Vancouver.
- Sanagiotto, D. (2003). *Características do escoamento sobre vertedouro em degraus de declividade 1V : 0,75H*. Dissertação de mestrado, Univerdade Federel do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

- Simões, A. L. (2008). *Considerações sobre a hidráulica de vertedouros em degraus Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento*. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Tozzi, J. M. (1992). *Caracterização/comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus*. Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.
- U. S. Army Corps of Engineers. (1997). *Hydraulic design criteria*. Vicksburg.
- Volkart, P., & Rutschmann, P. (1984). *Air Entrainment Divices (Air Slots)*. Zurich.

# APÊNDICE

Figura 59 - Pressões médias nos patamares para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar

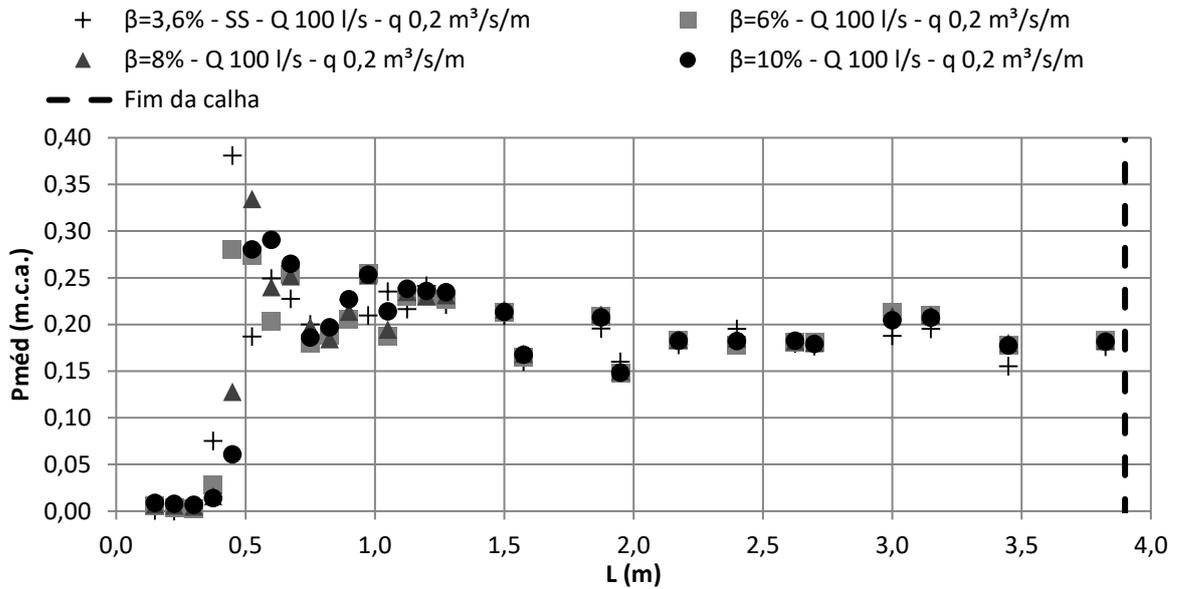


Figura 60 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar

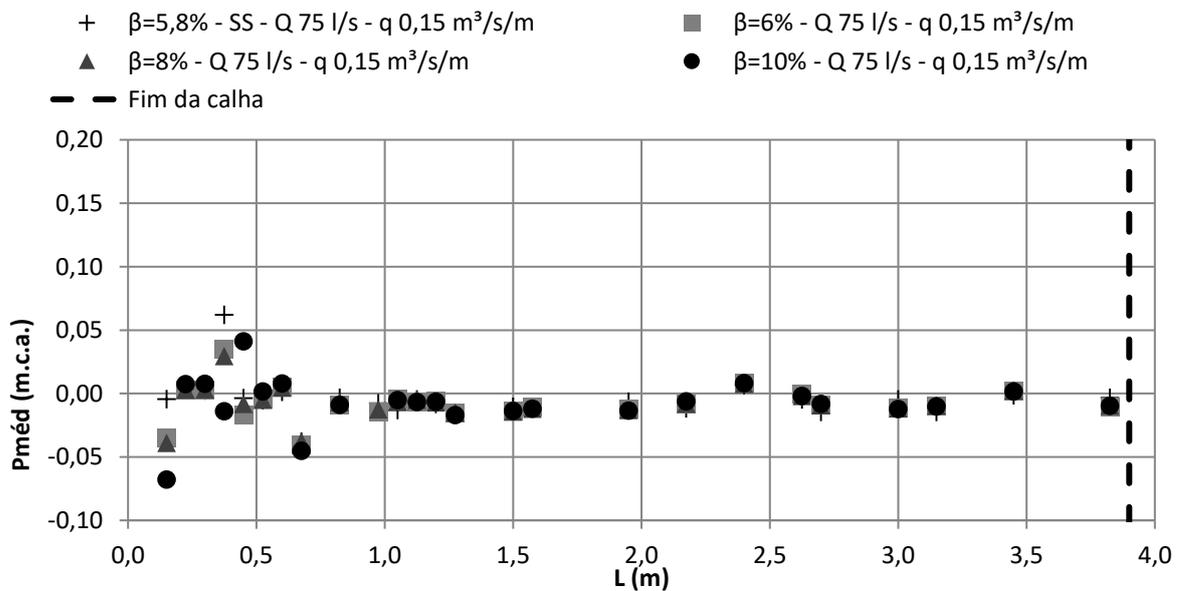


Figura 61- Pressões médias nos patamares para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar

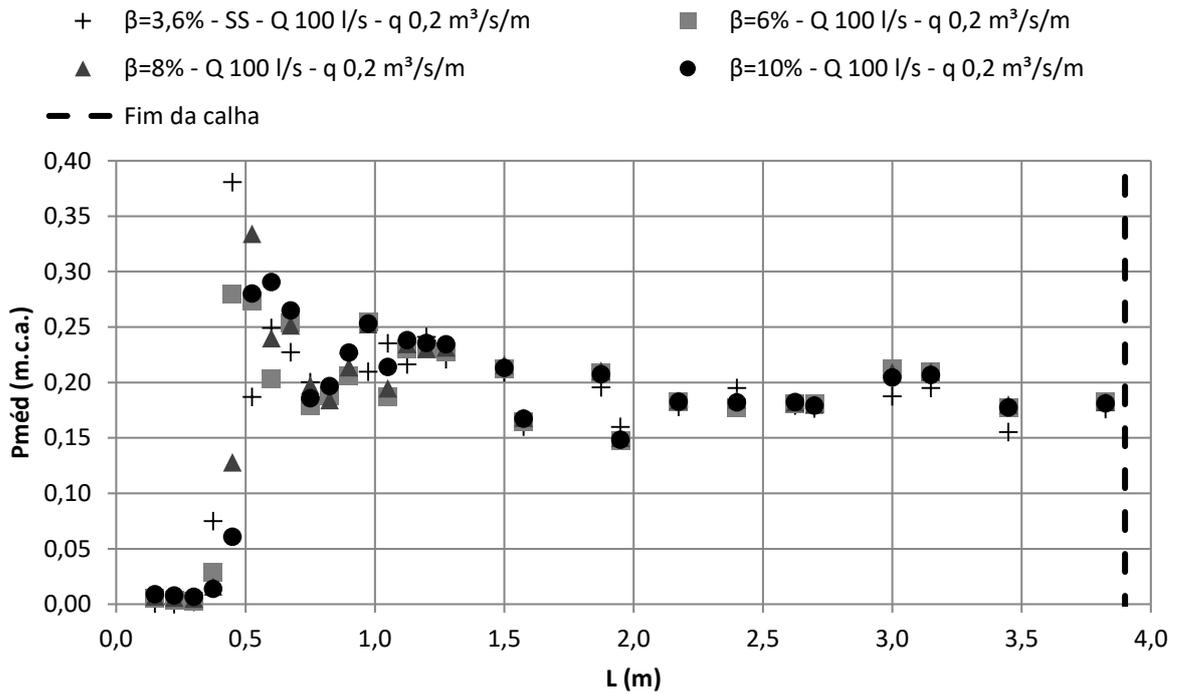


Figura 62 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar

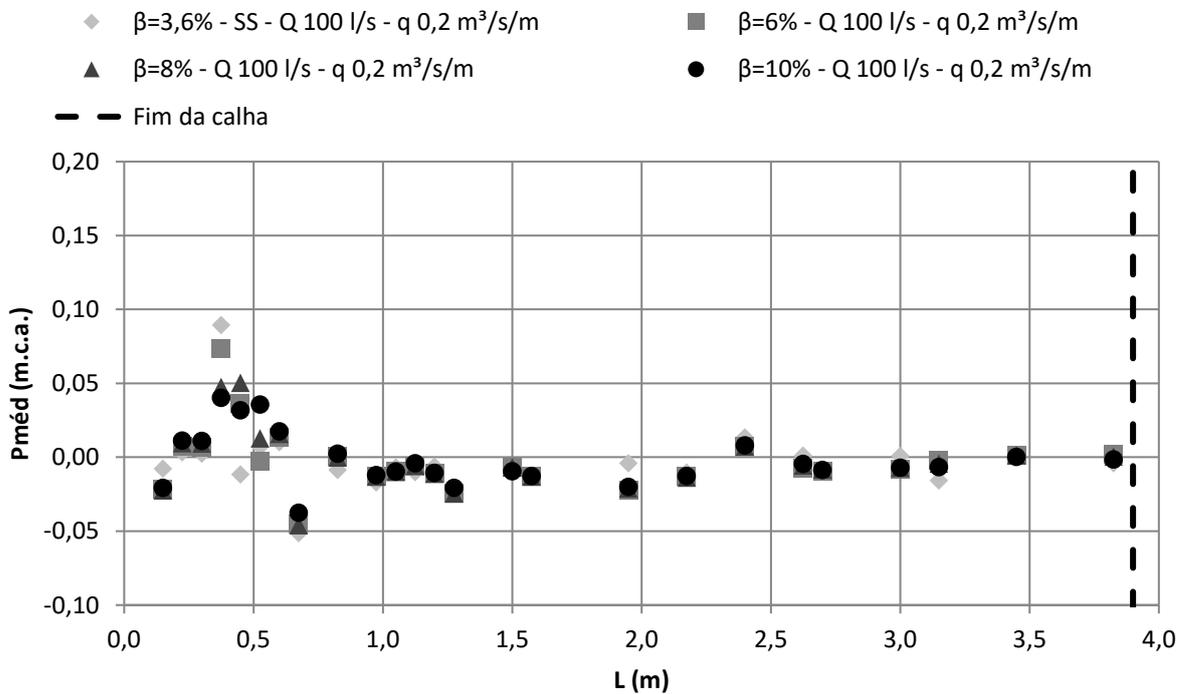


Figura 63 - Pressões médias nos patamares para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar

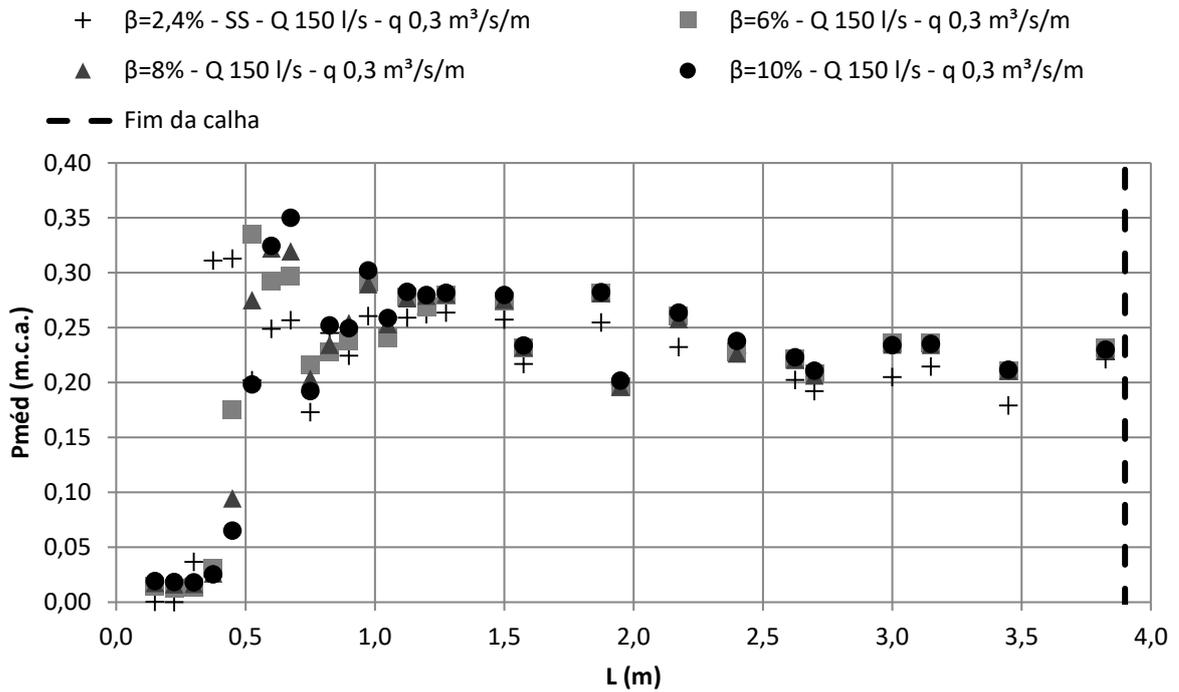


Figura 64 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar

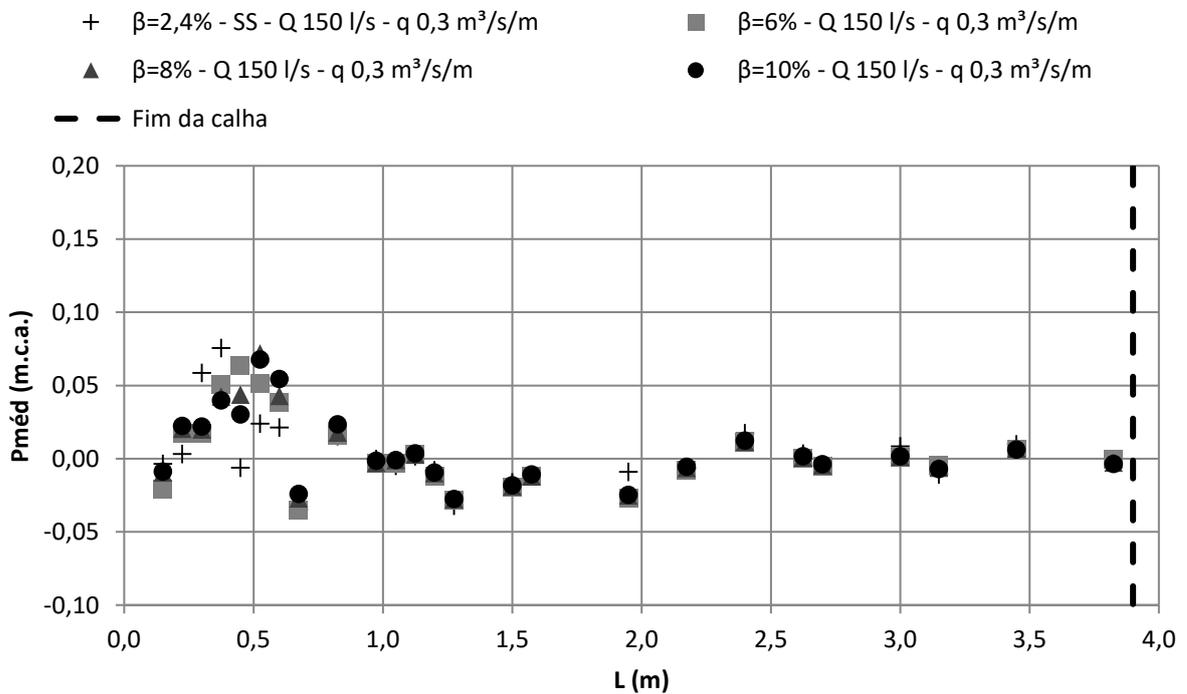


Figura 65 - Pressões médias nos patamares para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar

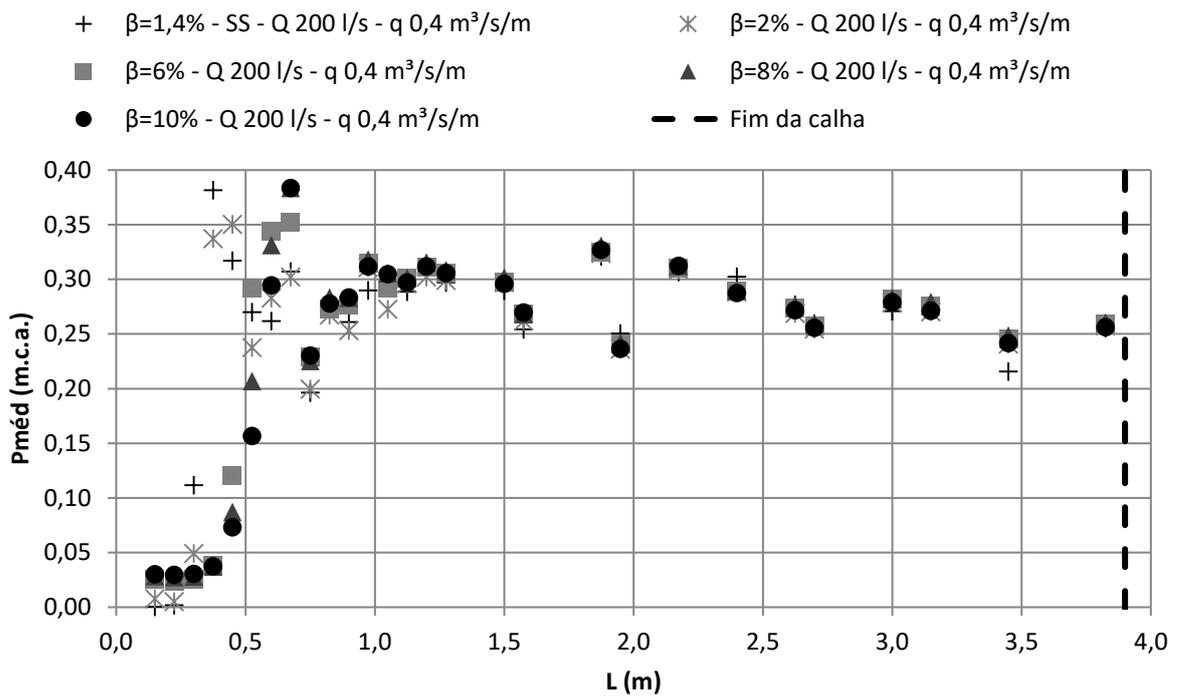


Figura 66 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar

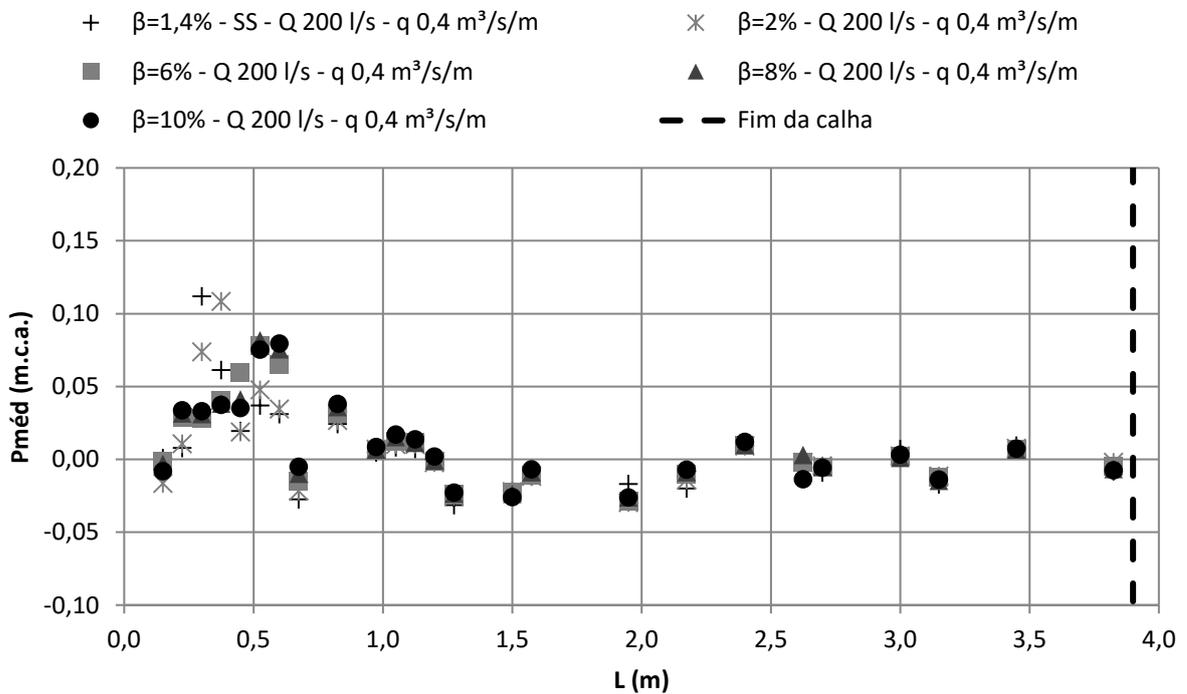


Figura 67 - Pressões médias nos patamares para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar

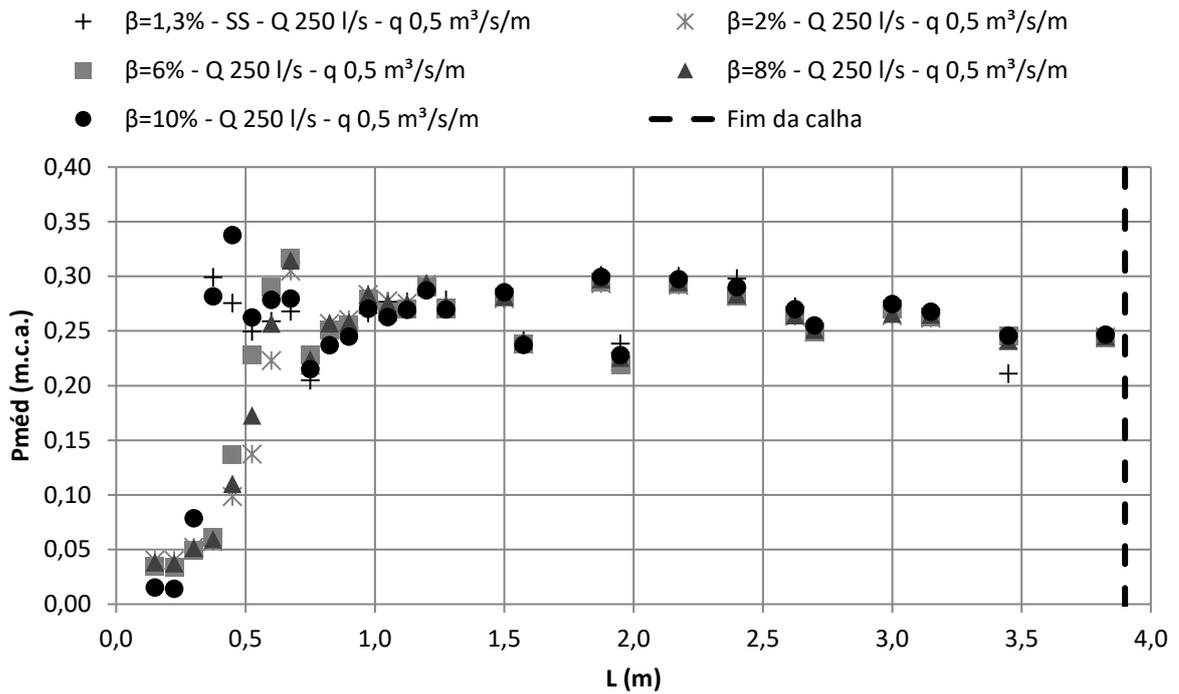


Figura 68 - Pressões médias nos espelhos para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar

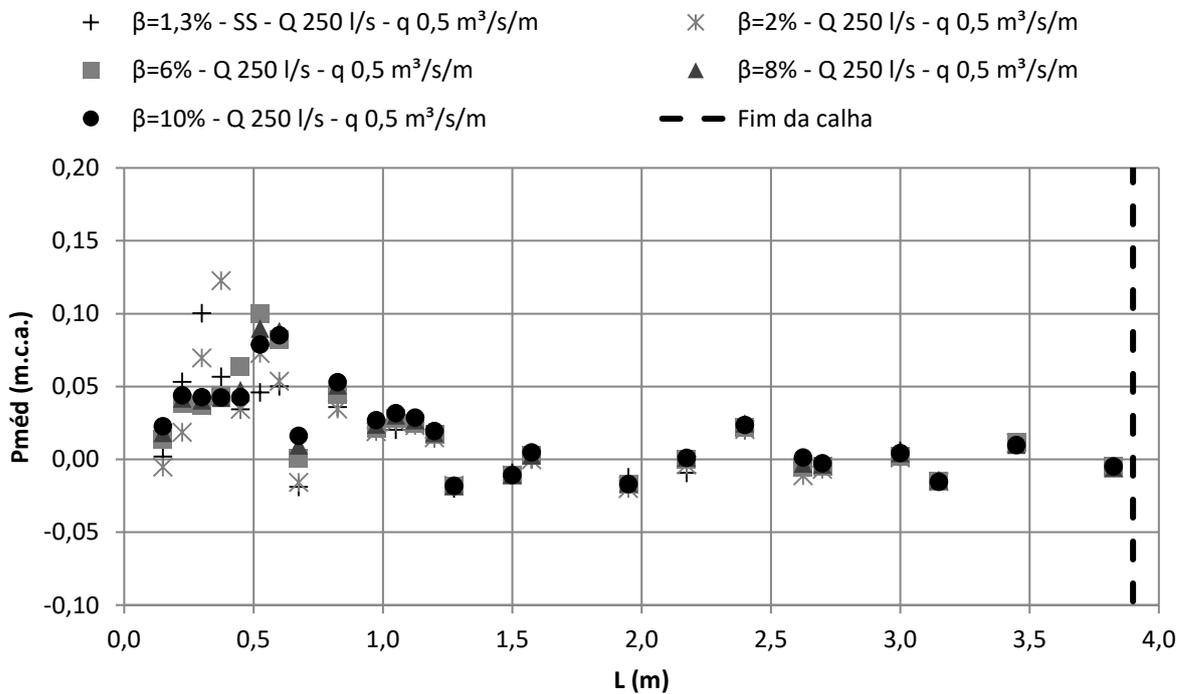


Figura 69 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar

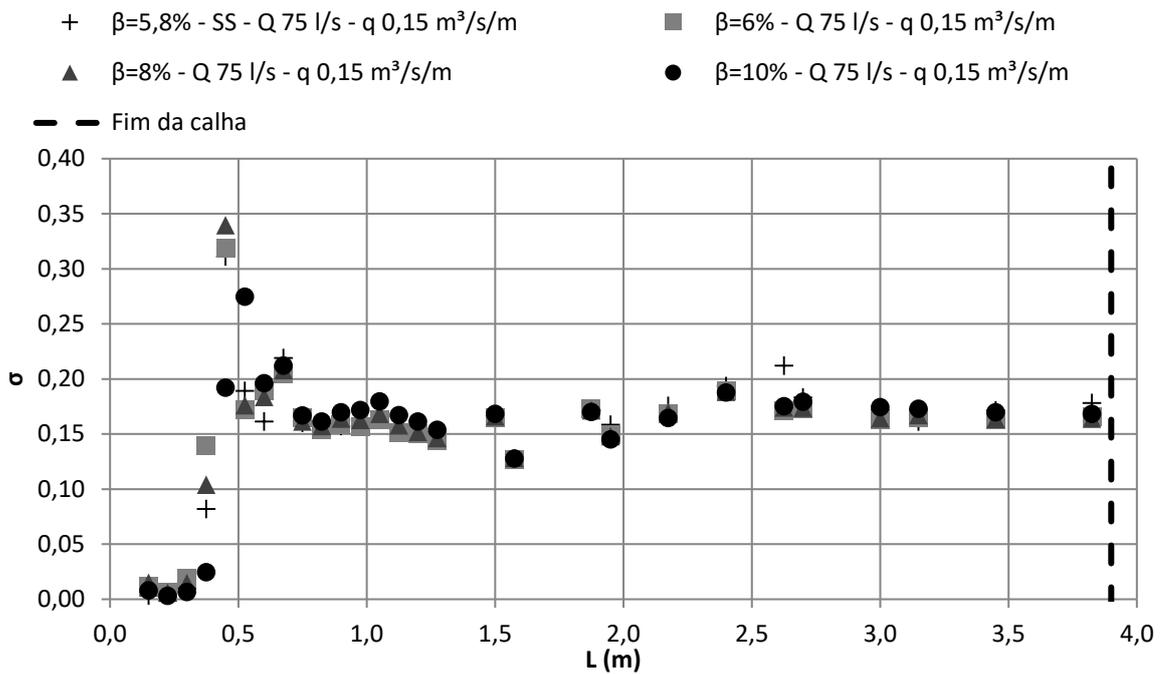


Figura 70 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 75 l/s com diversas condições de entrada de ar

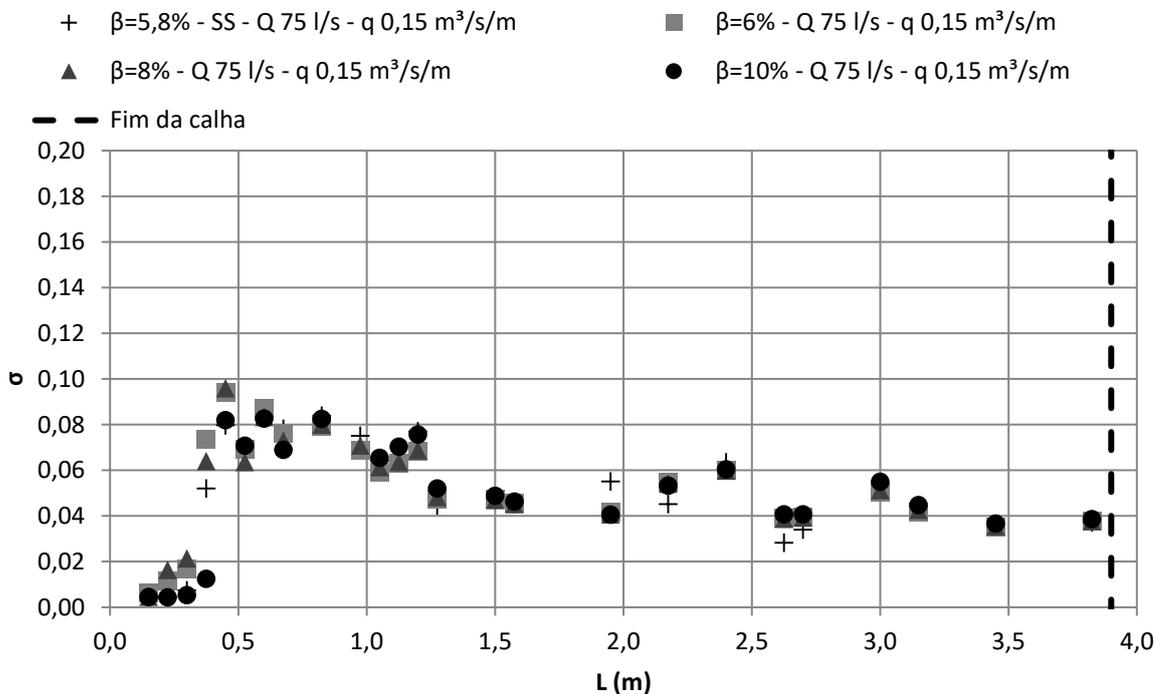


Figura 71 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar

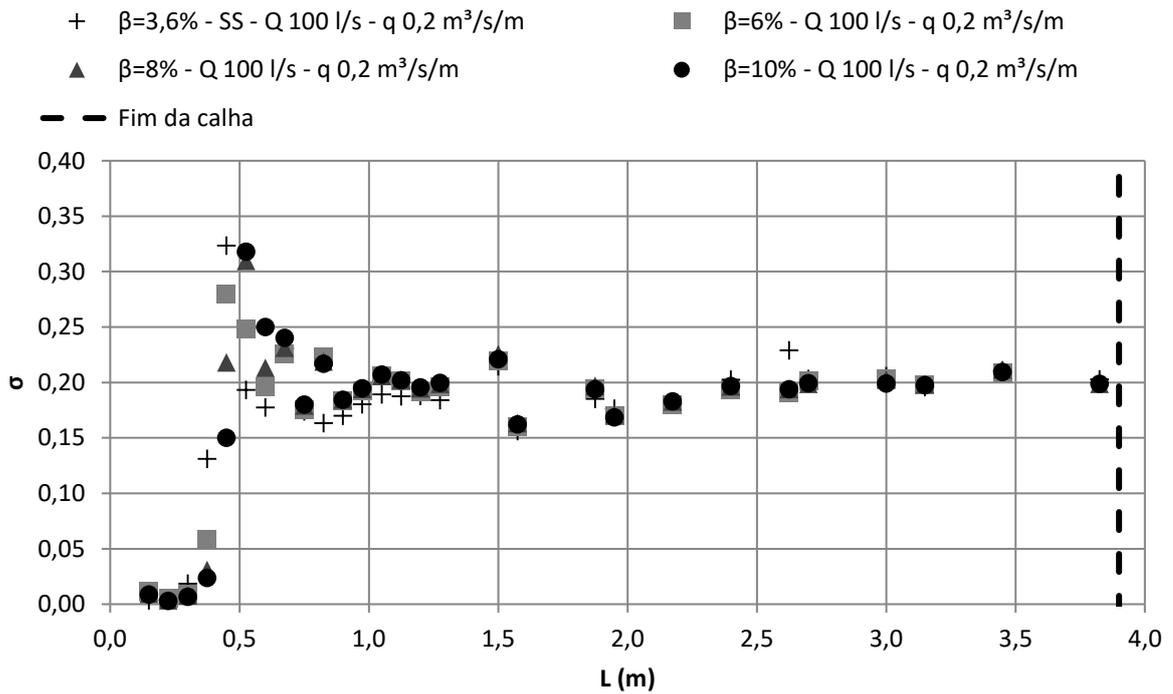


Figura 72 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 100 l/s com diversas condições de entrada de ar

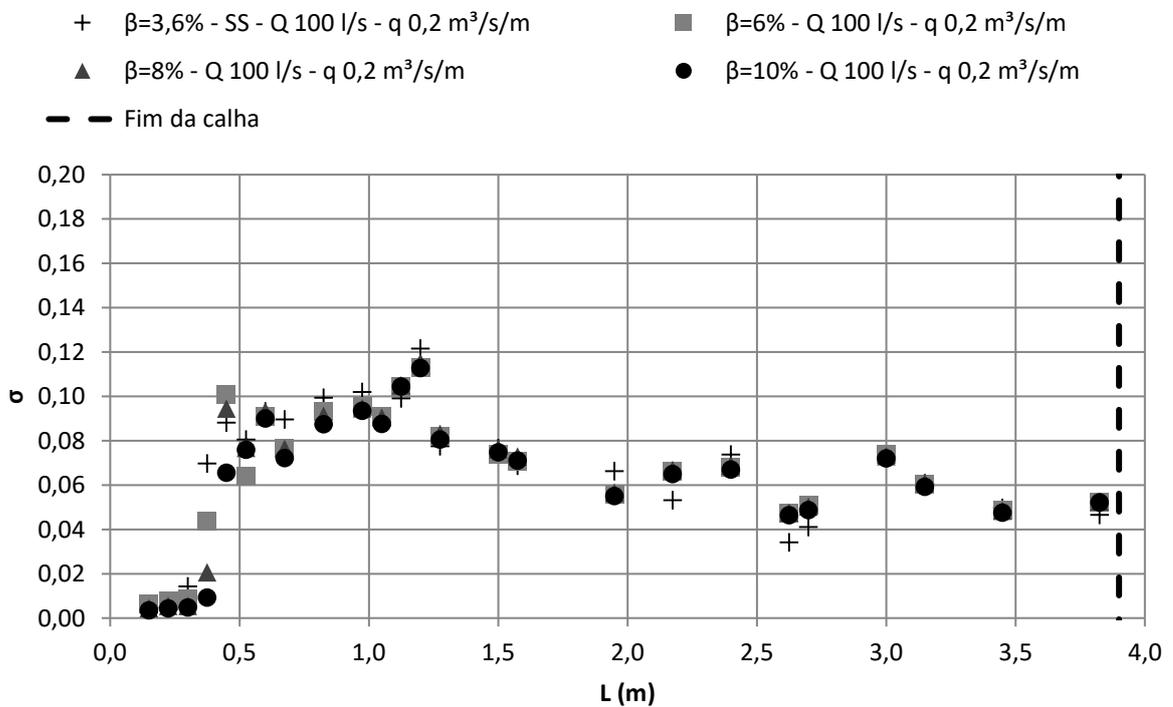


Figura 73 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar

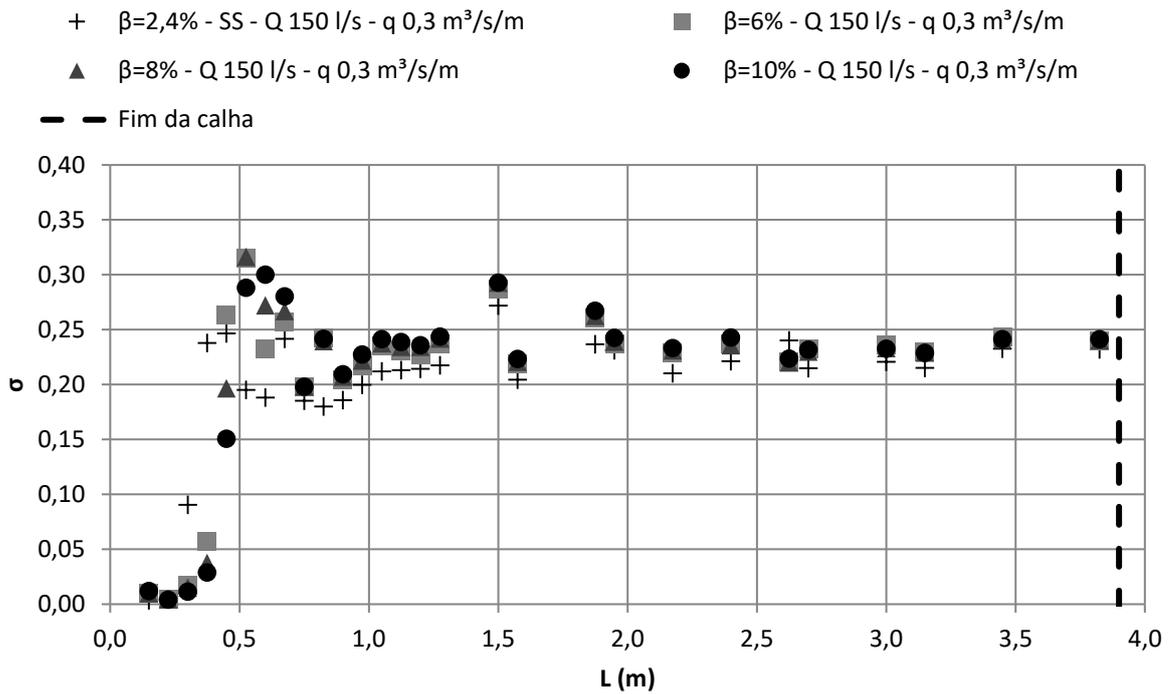


Figura 74 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 150 l/s com diversas condições de entrada de ar

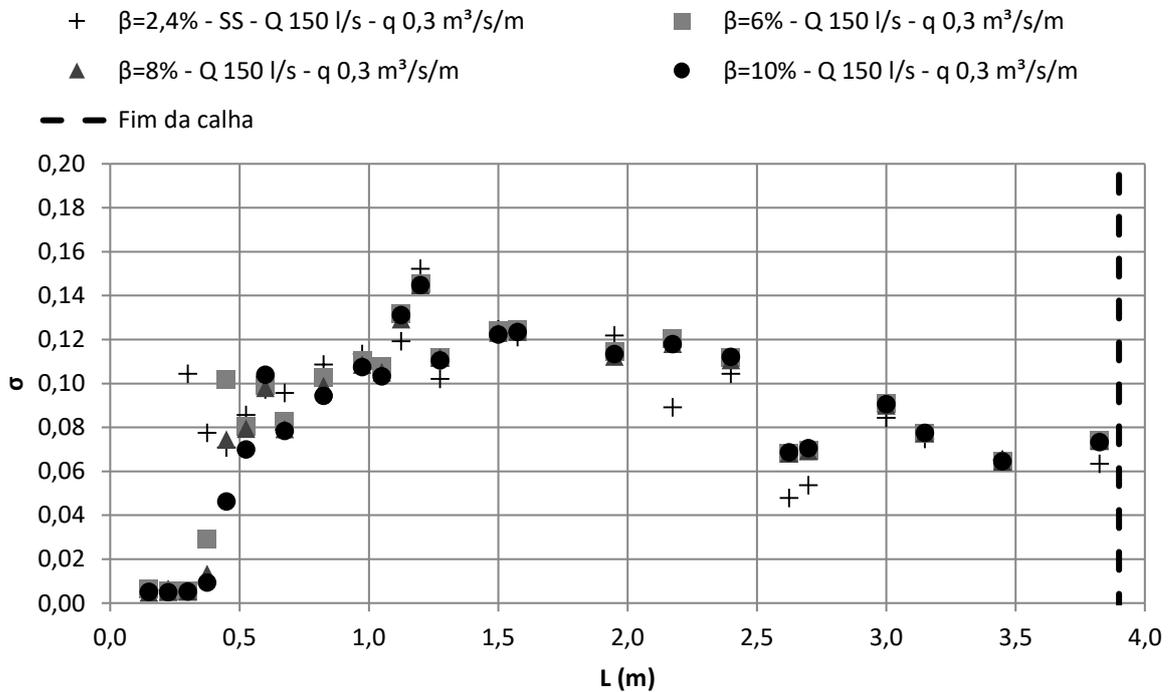


Figura 75 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar

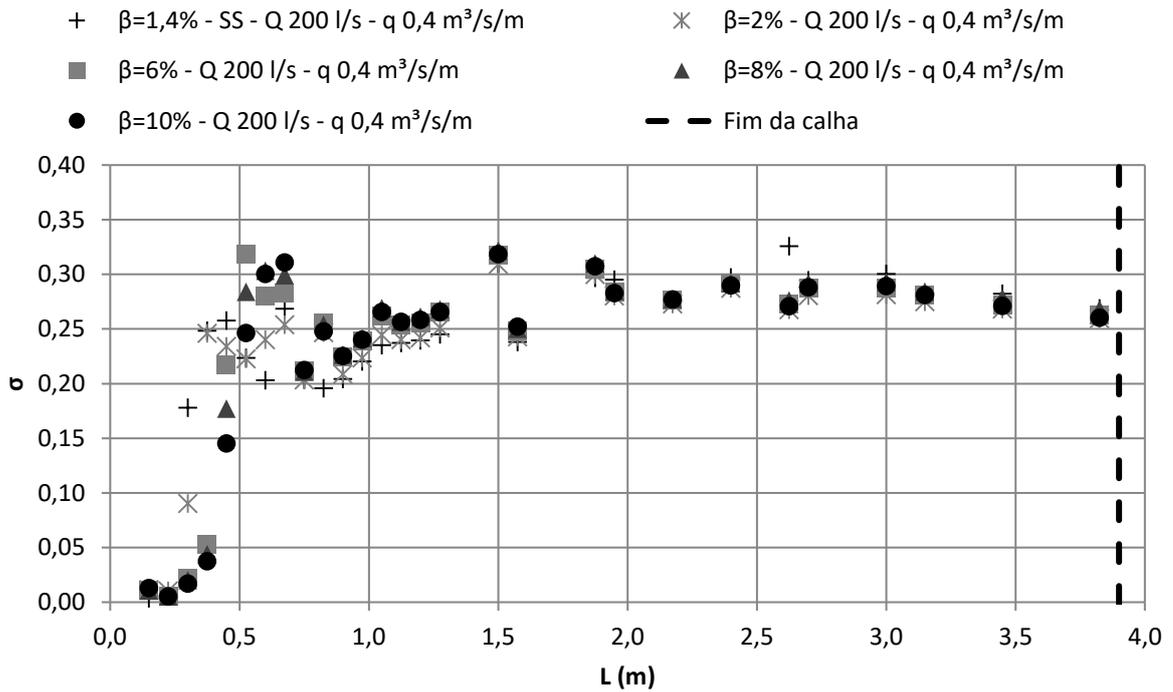


Figura 76 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 200 l/s com diversas condições de entrada de ar

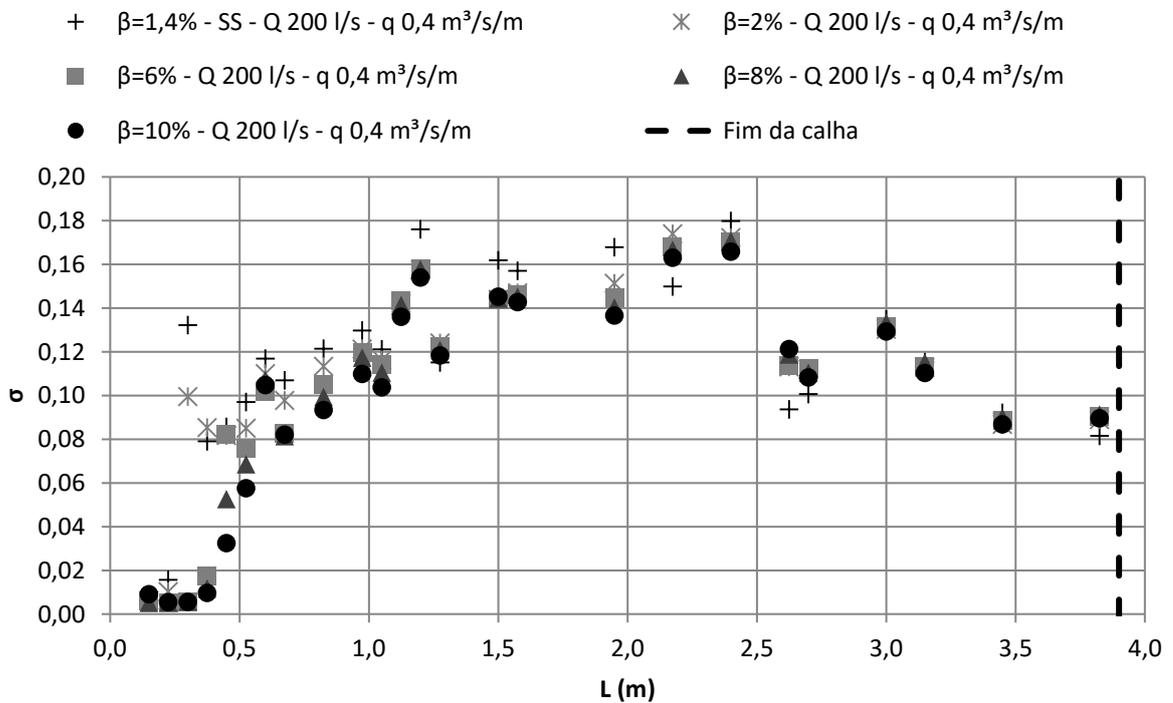


Figura 77 – Desvios padrão nos patamares para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar

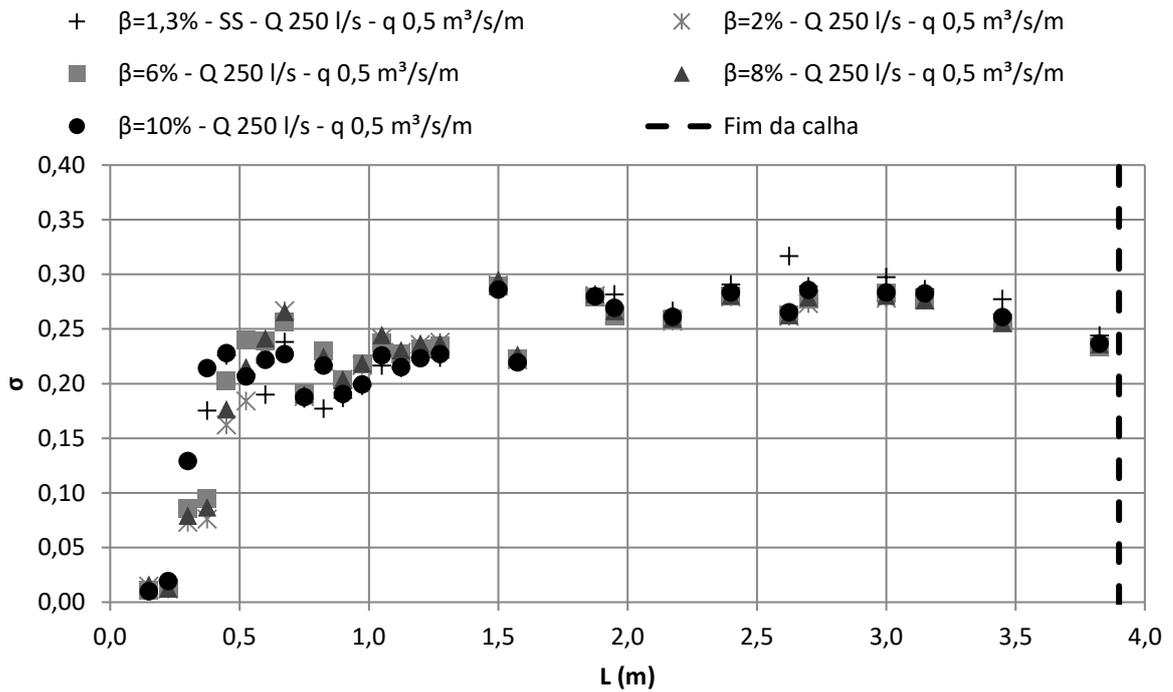


Figura 78 – Desvios padrão nos espelhos para vazão de 250 l/s com diversas condições de entrada de ar

