

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

RUTE FERLA

VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA: ANÁLISE DO ESCOAMENTO  
COM SISTEMA AERADOR EM DIFERENTES POSIÇÕES

PORTO ALEGRE  
Dezembro de 2022

RUTE FERLA

VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA: ANÁLISE DO ESCOAMENTO  
COM SISTEMA AERADOR EM DIFERENTES POSIÇÕES

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

Orientadores:

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira (Orientador)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques (Coorientador)

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Examinadores:

Prof. Dr. Jorge de Saldanha Gonçalves Matos

Instituto Superior Técnico (IST/Portugal)

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Mariane Kempka

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá

Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Ferla, Rute  
VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA: ANÁLISE  
DO ESCOAMENTO COM SISTEMA AERADOR EM DIFERENTES  
POSIÇÕES / Rute Ferla. -- 2022.  
260 f.  
Orientador: Eder Daniel Teixeira.

Coorientador: Marcelo Giulian Marques.

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

1. Estruturas hidráulicas. 2. Hidráulica  
experimental. I. Teixeira, Eder Daniel, orient. II.  
Marques, Marcelo Giulian, coorient. III. Título.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), e é fruto da parceria empresa-universidade firmada por meio de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento entre Furnas Centrais Elétricas e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Assim, agradeço à Eletrobrás Furnas e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), instituições financiadoras da pesquisa e concedentes das bolsas de estudo aos pesquisadores envolvidos no projeto.

Aos orientadores do trabalho, Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira e Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, agradeço pela oportunidade de atuar no LOH, pela confiança, paciência, amizade e ajuda, além de todo o aprendizado que me proporcionaram nos últimos anos. Em especial, agradeço ao Prof. Eder pelo exemplo de organização e tranquilidade, e ao Prof. Marcelo pelo exemplo de energia e dedicação no trabalho. Sou grata também aos demais professores que atuam no LOH e aos avaliadores do trabalho, pelas contribuições e correções essenciais. Ainda, não posso deixar de agradecer ao Prof. Mauricio, por seu empenho na obtenção das condições indispensáveis à realização das atividades experimentais no LOH, e também pelo apoio nas inúmeras tentativas de medição de concentração de ar no escoamento.

Este trabalho é de natureza experimental e só foi possível graças à dedicação de dezenas de amigos e colegas de graduação, pós-graduação e professores. Agradeço aos gênios, quarteto fantástico da instrumentação, Guilherme Santanna Castiglio, Gustavo Diefenbach, Lucas Santos Paim e Prof. Renato Machado de Brito, pela disposição, empenho e apoio. Agradeço à grande equipe que auxiliou, principalmente, na coleta de dados, montagem e manutenção da instalação experimental, entre outras atividades, nomeadamente: Alexandre Castro Prestes, Aline Elisabete Lorenzini, Augusto Ceron Reginatto, Camila da Silva Ramos, Daniel Rossoni Rocha, Douglas Marengo de Aquino, Fabiane Aquino da Silva, Fabricio Prates Desessards, Felipe Correia Presser, Fernanda Brasil Bica, Georgia Sinski Amadio, Giovanni da Silva Camponogara, Igor Augusto Barcelos da Silva, Isadora Melo Fraga, Kérlin Tais Wermann, Leandro Broch Ferreira, Leandro de Sousa Oliveira, Lohan Henrique Parma, Lucas Camargo da Silva Tassinari, Luisa Lüdtke Lauffer, Luyhana Costa Gessi, Marcos Vinícius Fernandes Trindade, Matheus Kunrath Oliveira, Matheus Victor Cruz, Pedro Guido Mottes Bassegio, Pedro Jorge Moraes, Pietro Gabriel Ramos Cunico, Priscila Maria Kipper, Sidarta Alves Prudente Vilar, Vanessa Cristina dos Santos Adamatti.

Deixo agradecimentos muito especiais à Carolina Kuhn Novakoski, pelas discussões, divagações e parceria. Ainda, à Priscila dos Santos Priebe, pela amizade e ajuda nos primeiros anos de LOH, à Aline Saupe Abreu, ao Guilherme Santanna Castiglio, ao Pedro Guido Mottes Bassegio e ao Renato Steinke Junior, pelas conversas e companheirismo pós-pandemia.

Por fim, agradeço aos meus pais e irmãos, pelo esforço incondicional, pelas privações e sacrifícios pelos quais passaram, ao longo de tantos anos, para que eu pudesse estudar. Ainda, não posso deixar de reconhecer a paciência, o carinho, o estímulo, a ajuda e a presença fundamental e constante do Sony nesse período.

## RESUMO

Estruturas hidráulicas submetidas a escoamentos em altas velocidades – como é o caso de vertedouros de barragens, por exemplo – são suscetíveis a danos em decorrência da cavitação. Contudo, a inserção de ar no escoamento pode reduzir ou até eliminar a erosão ocasionada por esse fenômeno. O objetivo do trabalho é, considerando um vertedouro com calha em degraus e com sistema aerador, analisar a influência da aeração induzida nas pressões hidrodinâmicas sobre os degraus, bem como avaliar a entrada de ar pelo sistema aerador. Os dados foram adquiridos em uma instalação experimental do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), que representa um vertedouro com ogiva de perfil padrão *Waterways Experiment Station* (WES, U. S. Army), com 60 degraus (6 cm de altura cada um) distribuídos ao longo de uma calha com 53° de inclinação com relação ao plano horizontal. Avaliou-se o escoamento sobre a referida estrutura considerado a instalação de um sistema aerador (formado por uma câmara de ar e um defletor) em dois locais ao longo da calha inclinada, de forma independente. Os dados adquiridos nessas condições foram comparados com a configuração de aeração natural (isto é, sem a inserção de elementos aeradores na estrutura). Para a aquisição de dados foram utilizados transdutores de pressão nas faces vertical e horizontal dos degraus, ao passo que a medição da entrada de ar no sistema aerador foi feita indiretamente, por meio da medição da velocidade de entrada de ar, com auxílio de uma sonda Pitot-Prandtl acoplada a um transmissor diferencial de pressão. Foram estabelecidas equações para previsão do comprimento do jato formado a jusante do defletor, bem como do coeficiente de entrada de ar proporcionado pelo sistema aerador. Além disso, foi proposto um modelo para previsão da distribuição das pressões hidrodinâmicas ao longo da calha inclinada, para as faces vertical e horizontal do degrau, em termos de pressões médias, do desvio padrão das pressões e das pressões extremas positivas e negativas (associadas às probabilidades de não excedência de 0,1%, 1%, 5%, 95%, 99% e 99,9%). As análises desenvolvidas permitiram concluir que, para garantir a melhor eficiência do sistema aerador, é imprescindível o estudo prévio do local ideal, ao longo da calha, onde este será instalado. A avaliação conjunta entre as pressões extremas negativas (medidas) e a concentração de ar no escoamento (estimada) permitiu concluir que, no caso de um protótipo com degraus de 90 cm de altura cada um, a adoção de um aerador nas proximidades do degrau nº10 permitiria um incremento nas vazões do escoamento (com segurança, sem riscos a danos por cavitação) da ordem de 70% em comparação com uma estrutura submetida à aeração natural ou com o mesmo aerador instalado no degrau nº1.

Palavras-chave: Estruturas hidráulicas, aeradores, cavitação.

## ABSTRACT

Hydraulic structures subjected to high-velocity flows – as in dam spillways, for example – are susceptible to damage due to cavitation. However, air insertion into the flow can reduce or even eliminate cavitation erosion. Regarding a stepped chute spillway, this work aims to evaluate the influence of the induced aeration on the hydrodynamic pressures on the steps and the air entrainment provided by the aerator system. Data were acquired in an experimental facility of the Institute of Hydraulic Research (IPH/UFRGS), which represents a Waterways Experiment Station ogee profile (WES, U.S. Army), with 60 steps (0,06 m high each) distributed in a chute with an angle of  $53^\circ$ . It was assumed that an aerator system (air chamber and deflector) was installed independently in two positions along the chute. Results acquired under these conditions were compared with the natural aeration configuration (without aeration elements in the structure). Pressure transducers were used on the vertical and horizontal faces of the steps, while the measurement of the air entrainment was performed indirectly, by measuring the air entrainment velocity, with a Pitot-Prandtl probe attached to a differential pressure transmitter. Equations were established to predict the jet length and the air entrainment coefficient. Furthermore, a model was presented to predict the distribution of hydrodynamic pressures along the chute, for the vertical and horizontal faces of the step, in terms of mean, standard deviation and extreme positive and negative pressures (associated with the non-exceed probabilities of 0.1%, 1%, 5%, 95%, 99% and 99.9%). It was concluded that to ensure the best efficiency of the aerator it is essential to previously study the ideal position, along the chute, where the system will be installed. By evaluating the extreme negative pressures and the air concentration it was concluded that, in a prototype with steps of 90 cm in height each, the adoption of an aerator near step no.10 would allow an increase in unit discharges (safely, without risk of cavitation damage) of the order of 70%, compared to a structure subjected to natural aeration or with the same aerator installed on step no.1.

Keywords: Hydraulic structures, aerators, cavitation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 – Fotografias da barragem Cotter, com ênfase para o vertedouro (a) e o aerador (b). .	26
Figura 3.1 – Representação esquemática, em vista lateral, dos parâmetros para vertedouro em degraus submetido à aeração natural.....	32
Figura 3.2 – Esquema, em vista lateral, de ocorrência da cavitação em irregularidade na superfície da estrutura e conseqüente erosão nas proximidades. Adaptado de Falvey (1990). ....	43
Figura 3.3 – Desenvolvimento da cavitação em superfície lisa com degrau. Esquemas em vista lateral, adaptado de Falvey (1990).....	44
Figura 3.4 – Velocidade do som em um escoamento composto por ar e água a uma temperatura de 10°C. Adaptado de Falvey (1990). ....	51
Figura 3.5 – Relação entre a perda de peso em corpos de prova de concreto e o índice de cavitação com o percentual de ar no escoamento. Adaptado de Peterka (1953). ....	52
Figura 3.6 – Estrutura utilizada nos estudos de Dong e Su (2006) e Dong et al. (2007, 2008, 2010). Adaptado de Dong et al. (2008). ....	53
Figura 3.7 – Pressão ao longo do tempo, em ensaios com diferentes condições de velocidade do escoamento e concentração de ar. Adaptado de Dong e Su (2006).....	54
Figura 3.8 – Relação entre a velocidade média do escoamento e a concentração de ar mínima para que não ocorra erosão por cavitação no concreto. Adaptado de Dong e Su (2006).....	54
Figura 3.9 – Concreto após ensaio de 5 min, $Ca = 0\%$ e $V = 50 \text{ m/s}$ (Dong et al., 2007). ....	55
Figura 3.10 – Concreto após ensaio de 15 min, $Ca = 4,8\%$ e $V = 50 \text{ m/s}$ (Dong et al., 2007).....	55
Figura 3.11 – Representação esquemática do dispositivo aerador em conjunto com o dispositivo adutor (formando o sistema aerador).....	57
Figura 3.12 – Regiões do escoamento em um dispositivo aerador e perfis de concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ e de pressão $P$ na superfície da estrutura. Esquema em vista lateral. Adaptado de Volkart e Rutschmann (1984) e Chanson (1989). ....	58
Figura 3.13 – Curvas características e ponto de funcionamento do sistema aerador. Adaptado de Volkart (1983). ....	60
Figura 3.14 – Representação esquemática, em vista lateral, dos parâmetros para vertedouros com calha lisa e em degraus submetidos à aeração induzida. ....	61
Figura 3.15 – Relação entre o coeficiente $\beta$ com a) $Fr_0$ , b) $\theta$ e c) $\alpha$ . As séries A até L indicam diferentes casos estudados pelos autores. Adaptado de Pfister e Hager (2010b).....	64
Figura 3.16 – Coeficiente $\beta$ em função de $Fr_0$ e $\theta$ . Adaptado de Terrier (2016). ....	65
Figura 3.17 – Coeficiente $\beta$ em função de $Fr_0$ , $\theta$ e $\alpha$ . Ajuste que resultou na Equação 3.28. Adaptado de Terrier (2016). ....	65
Figura 3.18 – Concentração de ar no escoamento em relação a $L/L_j$ . Adaptado de Pfister e Hager (2010a). ....	68
Figura 3.19 – Regiões do escoamento em um vertedouro em degraus com sistema aerador. Representação esquemática em vista lateral. Adaptado de Pfister et al. (2006a). ....	70
Figura 3.20 – Perfil de concentração de ar longitudinal, no fundo do escoamento, sobre um vertedouro em degraus com sistema aerador. Adaptado de Pfister et al. (2006a). ....	71



Figura 3.21 – Razão entre a concentração de ar a) média $C_a$ e b) no fundo $C_b$ , com a concentração de ar no escoamento quase uniforme $C_{au}$ e $C_{bu}$ , ao longo da calha em degraus, para $\alpha = 500$ . As séries em linha contínua e tracejada dizem respeito, respectivamente, a ensaios com $We$ maior e menor do que 100. Adaptado de Terrier (2016).....	74
Figura 3.22 – Representação da distribuição da concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ , ao longo da calha, conforme modelo proposto por Terrier (2016). A conexão entre os pontos característicos é indicativa. Adaptado de Terrier (2016). .....	75
Figura 3.23 – Concentração de ar no escoamento ao longo de vertedouros com calha a) em degraus sem aerador, b) em degraus com aerador e c) lisa com aerador. Adaptado de Terrier et al. (2015). .....	77
Figura 3.24 – Distribuição longitudinal da pressão média, na face vertical dos degraus, conforme dados de Marques et al. (2019), para $qp = 12,6 \text{ m}^2/\text{s}$ (escala de protótipo). Adaptado de Marques et al. (2019). .....	78
Figura 3.25 – Distribuição longitudinal de $P_{0,1\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando situações de aeração induzida (“pilar + defletor”) e natural. Adaptado de Priebe (2020), modelo LOH I.....	79
Figura 3.26 – Representação esquemática, em vista lateral, do escoamento sobre vertedouros em degraus com sistema aerador. Adaptado de Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) e Novakoski (2021). .....	81
Figura 3.27 – Dissipação de energia ao longo da calha, considerando escoamento sujeito à aeração natural e induzida, para duas vazões específicas ( $q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ e $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ ), conforme Tassinari (2022).....	84
Figura 3.28 – Sistema para controle da pressão sob o jato no modelo reduzido. Representação esquemática em vista lateral. Adaptado de Zagustin et al. (1982). .....	87
Figura 4.1 – Representação esquemática, em vista lateral, do modelo utilizado e detalhe de numeração dos degraus (sem escala). .....	90
Figura 4.2 – Fotografia da instalação experimental utilizada.....	90
Figura 4.3 – Esquemas, em vista lateral, das configurações de ensaio utilizadas, sendo elas a) aeração natural (NAT), b) aeração induzida com sistema aerador no degrau nº1 ( $D_1$ ) e c) aeração induzida com sistema aerador no degrau nº10 ( $D_{10}$ ). .....	93
Figura 4.4 – Dimensões aproximadas da câmara de ar, em cm. ....	94
Figura 4.5 – Registros, em vista diagonal e lateral, ilustrando aspectos do escoamento associados à condição NAT ( $q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ ). .....	98
Figura 4.6 – Registros fotográficos, em vista lateral, ilustrando aspectos do escoamento associados às condições de aeração induzida ( $D_1$ e $D_{10}$ ). .....	99
Figura 4.7 – Esquema, em seção transversal, do local de instalação da sonda de Pitot-Prandtl. ....	100
Figura 4.8 – Esquema em vista lateral, em uma seção transversal no eixo do canal, do local de instalação dos transdutores de pressão no degrau. Dimensões em mm. ....	102
Figura 5.1 – Faixa de $Fr_0$ de autores selecionados e do presente trabalho, nas condições de aeração induzida. ....	109

Figura 5.2 – Fotografias do escoamento na condição NAT, $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ , com destaque para pontos característicos. ....	110
Figura 5.3 – Fotografias do escoamento, em vista lateral, na condição $D_1$ , $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ , com destaque para pontos característicos. A representação do defletor é ilustrativa, apenas para indicar a posição. ....	111
Figura 5.4 – Fotografias do escoamento, em vista lateral, na condição $D_{10}$ , $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , com destaque para regiões e pontos característicos. A representação do defletor é ilustrativa, apenas. ....	112
Figura 5.5 – Aspecto visual geral do escoamento, em vista lateral, na condição $D_{10}$ , com destaque para o comportamento da superfície da linha d'água. ....	113
Figura 5.6 – Aspecto do jato formado pelo escoamento nas condições $D_1$ e $D_{10}$ , em vista lateral, nas regiões de impacto do jato e ocorrência de <i>blackwater</i> , $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	115
Figura 5.7 – Representação esquemática, em vista lateral, das condições $D_1$ e $D_{10}$ para $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	116
Figura 5.8 – Fotografias do escoamento, em vista lateral, na condição $D_1$ , $q = 0,054 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	117
Figura 5.9 – Fotografias do escoamento, em vista frontal, nas condições a) NAT, b) $D_1$ e c) $D_{10}$ , $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ . Os números em destaque representam os números dos degraus. ....	119
Figura 5.10 – Estimativa do comprimento do jato $L_j$ , com base em autores selecionados, em comparação com valores medidos. ....	120
Figura 5.11 – Influência de parâmetros selecionados na razão $L_j/h_0$ . ....	121
Figura 5.12 – Representação gráfica de parâmetros para previsão da razão $L_j/h_0$ . ....	122
Figura 5.13 – Coeficiente $\beta$ em função de $Fr_0$ . ....	123
Figura 5.14 – $P_{med}$ sobre as faces $H_2$ (configuração $D_1$ ) e $H_{11}$ (configuração $D_{10}$ ). ....	124
Figura 5.15 – Razão entre a subpressão sob o jato $\Delta p$ e a profundidade $h_0$ . ....	124
Figura 5.16 – Coeficiente $\beta$ em função de $L_j/h_0$ . ....	125
Figura 5.17 – Coeficiente $\beta$ em função de $Fr_0$ com resultados de Pfister (2008) apud Terrier (2016) e Terrier (2016). ....	125
Figura 5.18 – Coeficiente $\beta$ medido <i>versus</i> estimado em função de $Fr_0$ , com base em autores selecionados, nas condições $D_1$ e $D_{10}$ . ....	126
Figura 5.19 – Coeficiente de entrada de ar $\beta$ em função do parâmetro $\Psi$ . ....	127
Figura 5.20 – Coeficiente $\beta$ medido <i>versus</i> estimado, com base em autores selecionados e na Equação 5.7. ....	129
Figura 5.21 – Comportamento do parâmetro $P_{med}$ , na face horizontal do degrau, para $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	131
Figura 5.22 – Comportamento do parâmetro $P_{0,1\%}$ na face vertical dos degraus para a) $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ e b) $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	131
Figura 5.23 – Representação das pressões nas faces verticais dos degraus, adimensionalizadas com base na Equação 5.9 (eixo das ordenadas) e na Equação 5.10 (adimensional de posição, eixo das abscissas). ....	136

Figura 5.24 – Representação das pressões nas faces horizontais dos degraus, adimensionalizadas com base na Equação 5.9 (eixo das ordenadas) e na Equação 5.10 (adimensional de posição, eixo das abscissas).....	137
Figura 5.25 – Concentração de ar $C_b$ calculada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ . Representação separada caso a caso.....	144
Figura 5.26 – Destaque para o comportamento de $C_b$ , conforme modelo de Pfister et al. (2006a) aplicado à condição $D_1$ , $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	146
Figura 5.27 – Destaque para o comportamento de $C_b$ , conforme modelo de Terrier (2016) aplicado à condição $D_{10}$ , $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	147
Figura 5.28 – Representação conjunta da concentração de ar $C_b$ , calculada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ .....	148
Figura 5.29 – Resultados de concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ , pela aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a), na condição $D_1$ .....	150
Figura 5.30 – Fotografias de alguns dos pontos característicos do escoamento, condição $D_1$ , $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	151
Figura 5.31 – Concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ , ao longo da calha, nas condições NAT e $D_1$ , para $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	153
Figura 5.32 – Representação esquemática do escoamento, em vista lateral, nas condições NAT e $D_1$ , para $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	154
Figura 5.33 – Pressão $P_{0,1\%}$ medida e concentração de ar $C_b$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ . Os valores de pressão foram transferidos para a escala de protótipo considerando a escala geométrica 1:15 ( $h_d = 0,90 \text{ m}$ no protótipo). ....	157
Figura 6.1 – Representação esquemática, em vista lateral, do vertedouro considerado no exemplo (fora de escala).....	160
Figura 6.2 – Índice de cavitação ao longo da calha em função a) do parâmetro de posição $LNAT'$ e b) do número do degrau. Caso em que $qp = 25 \text{ m}^2/\text{s}$ e $Fk = 22,49$ . ....	162
Figura 6.3 – Representação esquemática, em vista lateral, do sistema aerador avaliado (fora de escala).....	163
Figura 6.4 – Distribuição das pressões extremas ao longo da calha, nas faces vertical (a, c) e horizontal (b, d) do degrau. ....	165
Figura 6.5 – Distribuição das pressões do escoamento ao longo da calha, na face vertical dos degraus, nas condições de aeração natural (NAT, em cinza) e induzida com aerador no degrau nº13 ( $D_{13}$ , em preto).....	166
Figura 6.6 – Distribuição das pressões extremas $P_{0,1\%}$ na face vertical dos degraus, conforme item 6.3, e da concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ (junto aos degraus). ....	168
Figura 6.7 – Representação esquemática, em vista lateral, do sistema aerador alternativo avaliado (fora de escala).....	169
Figura 6.8 – Distribuição das pressões extremas $P_{0,1\%}$ na face vertical dos degraus, e da concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ (junto aos degraus), considerando sistema aerador alternativo.....	170

Figura 9.1 – Representação esquemática, em vista lateral, das configurações de ensaio a) NAT (aeração natural), b) SS (aeração induzida sem soprador, idêntica à condição “D <sub>1</sub> ” definida no Capítulo 4) e c) CS (aeração induzida com soprador, para coeficientes $\beta$ pré-estabelecidos e iguais a 2%, 6%, 8% e 10%, a depender da vazão escoada, ver Tabela 9.1).....	190
Figura 9.2 – Parâmetro $P_{med}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	195
Figura 9.3 – Parâmetro $P_{\sigma}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	196
Figura 9.4 – Parâmetro $P_{0,1\%}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	197
Figura 9.5 – Parâmetro $P_{99,9\%}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	198
Figura 10.1 – Representação esquemática, em vista lateral, de metodologia para posicionamento do sistema aerador.....	201
Figura 10.2 – Índice de cavitação do escoamento $\sigma$ , ao longo da calha, para diferentes vazões específicas $q$ e alturas de degrau $hd$ (representando diferentes protótipos). ....	202
Figura 10.3 – Índice de cavitação do escoamento $\sigma$ e índice de cavitação crítico $\sigma_c$ , ao longo da calha, para diferentes vazões específicas em protótipo $qp$ e alturas de degrau $hd$ (representando diferentes protótipos). Os gráficos à esquerda estão associados a vazões específicas em modelo $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ e os da direita dizem respeito à $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .....	205
Figura 11.1 – Perfil de velocidades no interior do tubo de entrada de ar, ao longo de seu diâmetro. ....	207
Figura 11.2 – Ilustração do perfil de velocidades em escoamento em duto circular. Adaptado de White (2011). ....	208
Figura 14.1 – Parâmetro $L_j/h_0$ em função de $\delta$ e $\lambda$ , comparação com dados dos modelos LAHE I e II.....	215
Figura 14.2 – Coeficiente de entrada de ar $\beta$ em função do parâmetro $\Psi$ , comparação com dados dos modelos LAHE I e II.....	216

Figura 14.3 – Coeficiente $\beta$ medido <i>versus</i> estimado pela Equação 5.7, dados do presente trabalho e dos modelos LAHE I e II.....	217
Figura 14.4 – Avaliação do coeficiente $\beta$ em função da razão $L_j/h_0$ .....	218
Figura 14.5 – Pressões extremas ( $P_{0,1\%}$ , $P_{1\%}$ e $P_{5\%}$ ) na face vertical dos degraus no modelo LAHE II: valores adimensionalizados, faixa de vazões restrita a $0,070 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,177 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	220
Figura 15.1 – Influência de parâmetros geométricos e hidráulicos no coeficiente $\beta$ .....	222
Figura 15.2 – Coeficiente de entrada de ar $\beta$ como função de $\zeta$ .....	223
Figura 16.1 – Parâmetro $P_{med}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	227
Figura 16.2 – Parâmetro $P_{\sigma}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	228
Figura 16.3 – Parâmetro $P_{0,1\%}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	229
Figura 16.4 – Parâmetro $P_{99,9\%}/\gamma$ (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	230
Figura 16.5 – Parâmetro estatísticos das pressões em função da posição $LNAT - L_i$ (na condição NAT) e $L - L_j$ (nas condições $D_1$ e $D_{10}$ ), considerando $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita. ....	231
Figura 17.1 – Representação de $P_{0,1\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos), para a vazão $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	233
Figura 17.2 – Representação de resultados associados à condição $D_1$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos), para a vazão $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . ....	234
Figura 17.3 – Representação de $P_{med}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	235

Figura 17.4 – Representação de $P\sigma$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	236
Figura 17.5 – Representação de $P0,1\%$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	237
Figura 17.6 – Representação de $P1\%$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	238
Figura 17.7 – Representação de $P5\%$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	239
Figura 17.8 – Representação de $P_{med}$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	240
Figura 17.9 – Representação de $P\sigma$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	241
Figura 17.10 – Representação de $P95\%$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	242
Figura 17.11 – Representação de $P99\%$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	243
Figura 17.12 – Representação de $P99,9\%$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).....	244
Figura 18.1 – Concentração de ar no fundo do escoamento $C_b$ ao longo da calha, nas condições de aeração induzida ( $D_1$ e $D_{10}$ ), pelas metodologias de Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) e Novakoski (2021). ....	247
Figura 19.1 – Pressão $P0,1\%$ medida e concentração de ar $C_b$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:10 ( $hd = 0,60 m$ ). ....	252
Figura 19.2 – Pressão $P1\%$ medida e concentração de ar $C_b$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:10 ( $hd = 0,60 m$ ). ....	253
Figura 19.3 – Pressão $P5\%$ medida e concentração de ar $C_b$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:10 ( $hd = 0,60 m$ ). ....	254
Figura 19.4 – Pressão $P0,1\%$ medida e concentração de ar $C_b$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:15 ( $hd = 0,90 m$ ). ....	255
Figura 19.5 – Pressão $P1\%$ medida e concentração de ar $C_b$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:15 ( $hd = 0,90 m$ ). ....	256

Figura 19.6 – Pressão $P5\%$ medida e concentração de ar $Cb$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:15 ( $hd = 0,90 m$ ). .....	257
Figura 19.7 – Pressão $P0,1\%$ medida e concentração de ar $Cb$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:20 ( $hd = 1,20 m$ ). .....	258
Figura 19.8 – Pressão $P1\%$ medida e concentração de ar $Cb$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:20 ( $hd = 1,20 m$ ). .....	259
Figura 19.9 – Pressão $P5\%$ medida e concentração de ar $Cb$ estimada ao longo da calha, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , para a escala geométrica 1:20 ( $hd = 1,20 m$ ). .....	260

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Equações para cálculo da concentração de ar no escoamento sobre vertedouro em degraus submetido à aeração natural.....	34
Tabela 3.2 – Contribuições ao estudo de pressões sobre vertedouros em degraus submetidos à aeração natural.....	38
Tabela 3.3 – Coeficientes de ajuste da Equação 3.17. ....	41
Tabela 3.4 – Índice de cavitação crítico $\sigma_c$ associado ao escoamento sobre vertedouros em degraus, com base em autores selecionados.....	45
Tabela 3.5 – Limites de vazão específica e velocidade, em vertedouros em degraus submetidos à aeração natural, de modo a evitar-se a ocorrência do fenômeno da cavitação. ....	48
Tabela 3.6 – Equações que determinam o coeficiente $\beta$ .....	62
Tabela 3.7 – Equações que determinam o parâmetro $L_j$ . ....	66
Tabela 3.8 – Equações propostas por Terrier (2016) para estimativa dos valores de $C_b$ .....	75
Tabela 3.9 – Equações propostas por Terrier (2016) para estimativa da posição onde ocorrem os valores de $C_b$ (estimados, por sua vez, com base nas equações indicados na Tabela 3.8). ....	76
Tabela 3.10 – Recomendações para $Re$ e $We$ em modelos de sistemas aeradores e escoamentos bifásicos. Adaptado de Pfister e Hager (2010a). ....	86
Tabela 4.1 – Dimensões principais (ver Figura 4.1). ....	90
Tabela 4.2 – Vazões do escoamento consideradas (em modelo).....	95
Tabela 4.3 – Especificações do transmissor diferencial de pressão. ....	100
Tabela 5.1 – Compilado dos parâmetros principais do escoamento nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ . ....	104
Tabela 5.2 – Valores de profundidades medidas e calculadas com base nos critérios apresentados. ....	106
Tabela 5.3 – Principais parâmetros adimensionais do escoamento ( $Fr$ , $Re$ e $We$ ), considerando aeração induzida. ....	107
Tabela 5.4 – Principais parâmetros adimensionais do escoamento ( $Fr$ , $Re$ e $We$ ), considerando aeração natural.....	108
Tabela 5.5 – Parâmetros característicos do escoamento em termos de degraus e comprimento longitudinal da calha.....	114
Tabela 5.6 – Coeficiente $\beta$ medido nas condições $D_1$ e $D_{10}$ .....	123
Tabela 5.7 – Coeficientes da Equação 5.11 (face vertical do degrau). ....	138
Tabela 5.8 – Coeficientes da Equação 5.12 (face horizontal do degrau). ....	138
Tabela 5.9 – Avaliação dos parâmetros representativos do escoamento na aeração induzida, considerando os casos do presente trabalho, em comparação com os intervalos de validade dos modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016). ....	142
Tabela 5.10 – Degrau de ocorrência dos principais pontos característicos do escoamento, nas condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ , com base na análise visual dos ensaios. ....	145
Tabela 5.11 – Pontos característicos do escoamento na condição $D_1$ , representados em termos do nº do degrau onde ocorrem, definidos com base na análise visual do escoamento. ....	152



Tabela 6.1 – Dados do exemplo de aplicação prática. ....	160
Tabela 6.2 – Coeficientes da Equação 6.7. Adaptado de Matos et al. (2022). ....	162
Tabela 6.3 – Parâmetros do escoamento associados ao sistema aerador. ....	164
Tabela 6.4 – Principais parâmetros para estimativa de $C_b$ por Terrier (2016) e intervalo de validade indicado pelo autor. ....	167
Tabela 6.5 – Parâmetros do escoamento associados ao sistema aerador alternativo. ....	170
Tabela 9.1 – Configurações de ensaio – APÊNDICE A. ....	191
Tabela 9.2 – Características dos transdutores de pressão conectados na face horizontal dos degraus. ....	192
Tabela 9.3 – Características dos transdutores de pressão conectados na face vertical dos degraus. ....	193
Tabela 10.1 – Coeficientes da Equação 10.4. ....	203
Tabela 12.1 – Características dos transdutores de pressão conectados na face horizontal dos degraus. ....	210
Tabela 12.2 – Características dos transdutores de pressão conectados na face vertical dos degraus. ....	211
Tabela 13.1 – Intervalos considerados no estabelecimento de equações de previsão do coeficiente $\beta$ e do comprimento do jato $L_j$ . ....	212
Tabela 13.2 – Intervalos considerados no estabelecimento de equações de previsão de pressões e de concentração de ar $C_b$ . ....	213
Tabela 14.1 – Características principais dos modelos LAHE I e II frente ao modelo do presente trabalho. ....	214
Tabela 16.1 – Compilado de características principais das condições NAT, $D_1$ e $D_{10}$ (considerando a faixa $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ). ....	224

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_a$	área do dispositivo adutor de ar [m <sup>2</sup> ];
$A_w$	área do escoamento de água a montante do dispositivo aerador [m <sup>2</sup> ];
$C$	concentração de ar pontual no escoamento [%];
$C_a$	concentração de ar média no escoamento [%];
$C_{ai}$	concentração de ar média na seção de início de aeração no escoamento [%];
$C_{au}$	concentração de ar média na região onde o escoamento é quase uniforme [%];
$C_{a_{min}}$	concentração de ar média mínima para que não ocorra erosão por cavitação no concreto [%];
$C_b$	concentração de ar no fundo do escoamento [%];
$C_{b_{max}}$	concentração de ar máxima no fundo do escoamento [%];
$C_{b_{min}}$	concentração de ar mínima no fundo do escoamento [%];
$C_{bu}$	concentração de ar no fundo do escoamento, na região onde o escoamento é quase uniforme [%];
$C_{px\%}$	coeficiente de pressão, associado à probabilidade de não excedência x%;
$d$	altura do degrau imediatamente a jusante do defletor [m];
$F_{hd}$	número de Froude relacionado à altura do degrau, Equação 3.14;
$F_k$	número de Froude relacionado à rugosidade do degrau, Equação 3.13;
$Fr$	número de Froude do escoamento, Equação 3.45;
$Fr_0$	número de Froude do escoamento na seção de entrada do dispositivo aerador, Equação 3.19;
$Fr_i$	número de Froude do escoamento na seção onde inicia a aeração natural;
$Fr_j$	número de Froude do escoamento associado ao comprimento do jato;
$g$	aceleração da gravidade [m/s <sup>2</sup> ];
$h$	profundidade não aerada do escoamento [m];
$h_0$	profundidade do escoamento imediatamente a montante do defletor [m];
$h_{90}$	profundidade do escoamento onde $C = 0,90$ [m];
$h_c$	profundidade crítica do escoamento [m];
$h_d$	altura do degrau (dimensão da face vertical do degrau) [m];
$h_i$	profundidade do escoamento (de água) na seção de início de aeração [m];
$k$	rugosidade do degrau (ver Figura 3.1) [m];
$l_d$	largura do degrau (dimensão da face horizontal do degrau) [m];
$L$	distância longitudinal à calha, a contar da extremidade de jusante do dispositivo aerador [m];

$L'$	coordenada adimensional, definida de acordo com a Equação 5.10;
$L_0$	distância longitudinal à calha, desde a crista do vertedouro até a posição do defletor [m];
$L_a$	distância longitudinal à calha, desde a crista do vertedouro até o ponto de início de aeração natural total no escoamento [m];
$L_b$	comprimento da <i>blackwater</i> , a contar da extremidade de jusante do dispositivo aerador [m];
$L_{NAT}$	distância longitudinal à calha, desde a crista do vertedouro até o ponto em análise, conforme Figura 3.1 [m];
$L'_{NAT}$	coordenada adimensional, definida de acordo com a Equação 3.15;
$L_i$	distância longitudinal à calha, desde a crista do vertedouro até o ponto de início de aeração natural no escoamento, conforme Figura 3.1 [m].
$L_j$	comprimento do jato [m];
$L_{j\Delta p}$	comprimento do jato quando $\Delta p \neq 0$ [m];
$L_{ogiva}$	distância longitudinal desde a crista do vertedouro até o primeiro degrau da calha [m];
$L_{ref}$	comprimento de referência [m];
$L C_{bu}$	distância longitudinal à calha, a contar da extremidade de jusante do dispositivo aerador, até o ponto onde inicia $C_{bu}$ [m];
$L C_{b max}$	distância longitudinal à calha, a contar da extremidade de jusante do dispositivo aerador, até o ponto onde ocorre $C_{b max}$ [m];
$L C_{b min}$	distância longitudinal à calha, a contar da extremidade de jusante do dispositivo aerador, até o ponto onde ocorre $C_{b min}$ [m];
$n$	número do degrau;
$P$	pressão do escoamento [Pa];
$P_0$	pressão de referência [Pa];
$P_e$	pressão estática [Pa];
$P_{estag}$	pressão de estagnação [Pa];
$P_{med}$	pressão média do escoamento [Pa];
$P_{ref}$	pressão de referência [Pa];
$P_v$	pressão de vaporização da água [Pa];
$P_{x\%}$	pressão do escoamento associada à probabilidade de não excedência x% [Pa];
$P_\sigma$	desvio padrão das pressões (flutuação de pressão) [Pa];
$q$	vazão específica, ou vazão por metro de largura [m <sup>2</sup> /s];
$q_{max}$	vazão específica máxima [m <sup>2</sup> /s]
$q_p$	vazão específica, ou vazão por metro de largura, em escala de protótipo [m <sup>2</sup> /s];
$Q_{\acute{a}gua}$	vazão de água sobre o vertedouro [m <sup>3</sup> /s];

$Q_{ar}$	vazão de ar inserida pelo sistema aerador [ $m^3/s$ ];
$Re$	número de Reynolds do escoamento;
$t$	altura do defletor [m].
$V$	velocidade média do escoamento [m/s];
$V_{ref}$	velocidade média de referência [m/s];
$V_0$	velocidade média do escoamento imediatamente a montante do defletor [m/s];
$V_c$	velocidade crítica do escoamento [m/s];
$We$	número de Weber do escoamento;
$We_0$	número de Weber do escoamento na seção de entrada do dispositivo aerador;
$We_i$	número de Weber do escoamento na seção onde inicia a aeração natural;
$We_j$	número de Weber do escoamento associado ao comprimento do jato;
$Z$	parâmetro associado à energia do escoamento, a contar da linha de energia crítica [m].
$Z_0$	parâmetro associado à energia do escoamento imediatamente a montante do dispositivo aerador, a contar da linha de energia crítica [m].
$Z_A$ até $Z_F$	distâncias verticais associadas a regiões do escoamento definidas por Pfister et al. (2006a) [m];
$Z_2$ e $Z_3$	coordenadas verticais nas regiões II e III, respectivamente, definidas por Pfister et al. (2006a) [m];
$Z_{ogiva}$	distância vertical desde a crista do vertedouro até o primeiro degrau da calha [m];
$\alpha$	menor ângulo formado entre a calha inclinada do vertedouro e o plano horizontal [graus];
$\beta$	coeficiente de entrada de ar [%];
$\beta_{estimado}$	coeficiente de entrada de ar estimado por equação empírica [%];
$\beta_{medido}$	coeficiente de entrada de ar medido em ensaio [%];
$\gamma$	peso específico da água [ $N/m^3$ ];
$\Delta_p$	subpressão abaixo do jato, a jusante do dispositivo aerador [m];
$\theta$	ângulo do defletor [graus];
$\nu_w$	coeficiente de viscosidade cinemático da água [ $m^2/s$ ];
$\rho_{ar}$	massa específica do ar [ $kg/m^3$ ];
$\rho_w$	massa específica da água [ $kg/m^3$ ];
$\sigma$	índice de cavitação;
$\sigma_c$	índice de cavitação crítico;

$\sigma_c C_{px\%}$	índice de cavitação associado ao coeficiente de pressão referente à probabilidade de não excedência x%;
$\sigma_{wa}$	tensão superficial entre a água e o ar [N/m];
$\phi$	diâmetro do tubo de entrada de ar [m].

Obs.: as profundidades são sempre perpendiculares à direção do escoamento.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	25
1.1	ESTRUTURA DO TEXTO .....	28
2	OBJETIVOS .....	30
2.1	OBJETIVO GLOBAL .....	30
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	30
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
3.1	AERAÇÃO NATURAL EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS .....	31
3.1.1	Concentração de ar no escoamento .....	33
3.1.2	Pressões sobre os degraus.....	36
3.2	CAVITAÇÃO.....	41
3.2.1	Cavitação vaporosa.....	42
3.2.2	Índice de cavitação em vertedouros.....	44
3.2.3	Cavitação em vertedouros em degraus .....	46
3.3	AERAÇÃO COMO FORMA DE EVITAR DANOS DECORRENTES DA CAVITAÇÃO 50	
3.4	AERADORES EM VERTEDOUROS.....	55
3.4.1	Coeficiente de entrada de ar $\beta$ .....	61
3.4.2	Comprimento do jato $L_j$ .....	66
3.4.3	Concentração de ar no escoamento .....	67
3.4.4	Pressões sobre os degraus.....	77
3.4.5	Aspecto visual do escoamento.....	81
3.4.6	Dissipação da energia do escoamento .....	82
3.5	EFEITOS DE ESCALA.....	84
3.6	LACUNAS DO CONHECIMENTO .....	87
4	METODOLOGIA.....	89
4.1	CARACTERIZAÇÃO GERAL .....	89
4.1.1	Instalação experimental.....	89
4.1.2	Configurações de ensaio.....	91
4.1.3	Vazões ensaiadas .....	94
4.1.4	Parâmetros adimensionais – $Fr$ , $Re$ e $We$ .....	95

4.2	REGIÕES E PONTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO .....	96
4.2.1	Aeração natural (NAT).....	96
4.2.2	Aeração induzida ( $D_1$ e $D_{10}$ ) .....	97
4.3	ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO E DO COEFICIENTE $\beta$ .....	99
4.3.1	Medição do coeficiente $\beta$ .....	99
4.3.2	Medição de pressão .....	101
4.4	CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS SOBRE A INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL .....	103
5	RESULTADOS .....	104
5.1	PARÂMETROS ADIMENSIONAIS – $Fr$ , $Re$ , $We$ .....	105
5.1.1	Profundidade a montante do defletor ( $h_0$ ).....	105
5.1.2	Cálculo dos parâmetros adimensionais e avaliação do efeito de escala .....	106
5.2	REGIÕES E PONTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO .....	109
5.2.1	Previsão do comprimento do jato $L_j$ .....	119
5.3	COEFICIENTE DE ENTRADA DE AR $\beta$ .....	122
5.3.1	Coeficiente $\beta$ medido e subpressão sob o jato $\Delta p$ .....	123
5.3.2	Avaliação do coeficiente $\beta$ com base na literatura.....	124
5.3.3	Previsão do coeficiente $\beta$ .....	126
5.4	PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS PRESSÕES NOS DEGRAUS .....	130
5.5	PREVISÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES AO LONGO DA CALHA.....	133
5.6	AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AR NO ESCOAMENTO .....	140
5.6.1	Considerações sobre a estimativa de $C_b$ na condição $D_1$ .....	149
5.6.2	Considerações sobre $C_b$ nas condições NAT e $D_1$ .....	152
5.6.3	Análise conjunta entre $C_b$ e as pressões extremas mínimas $P_{0,1\%}$ .....	156
6	EXEMPLO DE APLICAÇÃO PRÁTICA.....	160
6.1	POSICIONAMENTO DO SISTEMA AERADOR .....	160
6.2	PARÂMETROS DO ESCOAMENTO .....	163
6.3	DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES.....	164
6.4	ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE AR.....	167
6.5	ADICIONAL: AVALIAÇÃO DE OUTRA GEOMETRIA DE AERADOR .....	169
6.6	PASSO A PASSO PARA APLICAÇÃO PRÁTICA .....	172
7	CONCLUSÕES .....	173

7.1	PARÂMETROS ADIMENSIONAIS – $Fr$ , $Re$ , $We$ .....	173
7.2	REGIÕES E PONTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO .....	174
7.3	COEFICIENTE DE ENTRADA DE AR $\beta$ .....	175
7.4	DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES SOBRE OS DEGRAUS.....	175
7.5	AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AR NO ESCOAMENTO .....	177
7.6	ANÁLISE CONJUNTA ENTRE AS PRESSÕES E A CONCENTRAÇÃO DE AR....	177
7.7	EXEMPLO DE APLICAÇÃO PRÁTICA.....	178
7.8	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	179
8	REFERÊNCIAS.....	181
9	APÊNDICE A.....	189
10	APÊNDICE B.....	201
11	APÊNDICE C.....	207
12	APÊNDICE D.....	209
13	APÊNDICE E.....	212
14	APÊNDICE F.....	214
15	APÊNDICE G.....	222
16	APÊNDICE H.....	224
17	APÊNDICE I.....	232
18	APÊNDICE J.....	245
19	APÊNDICE K.....	248



# 1 INTRODUÇÃO

A concepção de vertedouros com canais em degraus tornou-se comum em barragens construídas com a técnica de concreto compactado com rolo, CCR (CHANSON, 1993), sendo impulsionada no século XIX e início do século XX (MATOS e MEIRELES, 2014). O crescente interesse na construção de vertedouros em degraus não está relacionado apenas às vantagens do método CCR – que, por utilizar menor teor de cimento no concreto (quando comparado ao concreto tradicional), reduz os custos de construção da estrutura – mas também à maior dissipação de energia ao longo da calha (CHANSON, 1994; BOES e HAGER, 2003a,b). Se comparado com vertedouro semelhante, mas construído em canal liso, os vertedouros em degraus aumentam a dissipação de energia do escoamento ao longo da queda, o que reduz as dimensões e, conseqüentemente, os custos da estrutura de dissipação construída a jusante.

Estruturas hidráulicas submetidas a escoamentos em altas velocidades<sup>1</sup> – como é o caso de vertedouros de barragens, por exemplo – são suscetíveis a danos em decorrência do fenômeno da cavitação (FALVEY, 1990; KELLS e SMITH, 1991). Sabe-se, porém, que pequenas quantidades de ar<sup>2</sup> inseridas no escoamento podem reduzir ou até eliminar os danos de erosão consequentes da cavitação, conforme conclusões pioneiras de Peterka (1953), corroboradas por Russel e Sheehan (1974), Dong et al. (2007, 2008, 2010), dentre outros. Técnicas para aerar o escoamento por meio da inserção de dispositivos aeradores nas estruturas têm se mostrado uma alternativa eficiente na redução de danos em vertedouros de calha lisa, como é o caso, por exemplo, do sistema introduzido no vertedouro da barragem Foz do Areia, descrito por Pinto et al. (1982).

No caso de vertedouros em degraus, as rugosidades proporcionadas pelos degraus ao escoamento fazem com que a camada limite turbulenta atinja a superfície mais a montante na calha, fazendo com que o processo de aeração natural no escoamento inicie antecipadamente, em comparação com vertedouros de calha lisa. A jusante do ponto de início de aeração, a estrutura poderá estar mais protegida dos efeitos nocivos da cavitação, desde que exista ar nas proximidades da calha (no fundo do escoamento). Por outro lado, a montante do início de aeração, a estrutura estará exposta. No caso de vertedouros em degraus, estes são mais suscetíveis à ocorrência de danos por cavitação do que calhas lisas em virtude:

- i. da irregularidade formada pelos degraus, salientes ao escoamento (TERRIER, 2016);
- ii. das pressões negativas que ocorrem, especialmente, nas faces verticais dos degraus.

Por esses motivos, vertedouros em degraus costumam ser dimensionados para vazões específicas que não excedem o intervalo de 15 a 30 m<sup>2</sup>/s (PFISTER et al., 2006a; AMADOR et al., 2009), muito

---

<sup>1</sup> Isto é, velocidades que superam cerca de 30 m/s, de acordo com Kells e Smith (1991).

<sup>2</sup> No caso, Peterka (1953) concluiu que cerca de 7% de ar (com relação ao volume de água do escoamento) foi suficiente para eliminar erosões no concreto.

inferiores se comparadas às vazões de dimensionamento de calhas lisas – da ordem de  $100 \text{ m}^2/\text{s}$ , de acordo com Pfister et al. (2006a).

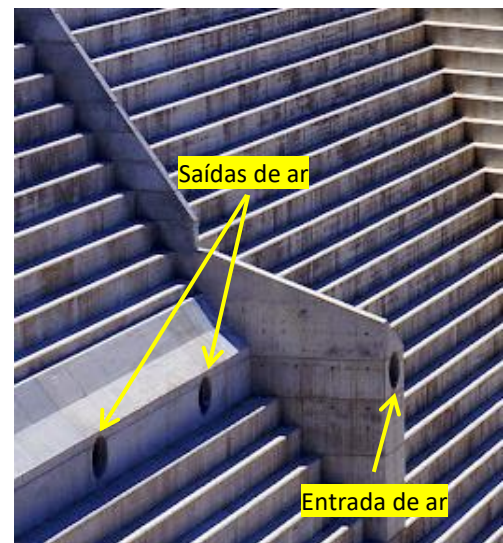
Deve-se destacar que, na prática, o desempenho de vertedouros em degraus sem aeradores tem se mostrado satisfatório, mesmo nos casos em que houve a passagem de cheias consideráveis sobre a estrutura (MATOS e MEIRELES, 2014; CHANSON, 2015). Por esse motivo, até o momento, a própria aeração natural do escoamento foi capaz de proteger os degraus dos danos decorrentes da cavitação, em virtude das baixas vazões específicas de dimensionamento (FRIZELL et al., 2013). Há exemplos de vertedouros em degraus cujas vazões específicas de projeto excedem os limites recomendados para essas estruturas, conforme exemplos constantes em Matos e Meireles (2014), contudo, tais casos são menos comuns.

Há registros, especialmente nas duas últimas décadas, da construção de vertedouros em degraus com sistemas aeradores. A maioria dos registros diz respeito à inserção de diferentes tipos de pilares, como nas barragens chinesas Dachaoshan, Shuidong e Suofengying (KOEN et al., 2017), ou de aeradores denteados, como na barragem Wadi Dayqah (PRISK et al., 2009), em Omã. Até o momento, pode-se dizer que a adoção de aeradores do tipo defletor e câmara de ar é pouco expressiva em vertedouros em degraus existentes – provavelmente, em razão da relativa incipiência no entendimento do escoamento sobre esse arranjo estrutural. Ao que tudo indica, tem-se como exemplo mais próximo ao arranjo avaliado neste trabalho o existente na barragem Cotter (Austrália), Figura 1.1. Seu vertedouro possui 85 m de altura,  $53^\circ$  de inclinação com relação ao plano horizontal, é composto por degraus com 1,2 m de altura cada um e foi dimensionado para a vazão específica de  $48 \text{ m}^2/\text{s}$  (WILLEY et al., 2010). O sistema aerador está posicionado 25 m abaixo da crista do vertedouro e é composto por uma galeria de ar com 2,5 m de diâmetro, ao passo que os pontos de entrada e saída de ar possuem 1,8 m de diâmetro cada um (WILLEY et al., 2010).



a) Vista diagonal do vertedouro

(CE CONSTRUCTION SOLUTIONS, 2015).



b) Vista em detalhe do aerador

(RIOTACT, 2013).

Figura 1.1 – Fotografias da barragem Cotter, com ênfase para o vertedouro (a) e o aerador (b).

Como representado na Figura 1.1, a montante do defletor, a calha também é composta por degraus. O aerador adotado na barragem Cotter possui geometria especial e complexa e é distinto do sistema considerado no presente trabalho (ainda que seja a estrutura existente com arranjo mais próximo, segundo a literatura verificada), como será melhor introduzido adiante. Conforme informações constantes em Willey et al. (2010), foi dimensionado considerando equações estabelecidas para aeradores instalados em calhas lisas – provavelmente, em razão das escassas informações quanto à adoção de aeradores em vertedouros em degraus. Com relação à vazão específica de dimensionamento do vertedouro da barragem Cotter, o valor de  $48 \text{ m}^2/\text{s}$  excede consideravelmente a prática recorrente (da ordem de 15 a  $30 \text{ m}^2/\text{s}$ , como reportado). O comportamento hidráulico do vertedouro foi avaliado por modelos numérico e físico (WILLEY et al., 2010), contudo, não há registros da avaliação da concentração de ar no escoamento sobre a estrutura. Assim sendo, ao que tudo indica, é a prática de uso ao longo dos anos que vai determinar se essa estrutura estará ou não exposta aos possíveis danos decorrentes da cavitação.

Nas últimas duas décadas, estudos experimentais vêm sendo realizados em modelos físicos de calhas em degraus com sistemas aeradores (situação também denominada de aeração forçada ou induzida), podendo-se mencionar, por exemplo, as importantes contribuições de Pfister et al. (2006a, b), Zamora et al. (2008), Terrier (2016), entre outros. Esses autores analisaram, em particular, os perfis de concentração de ar no escoamento com os objetivos de (i) melhor entender o comportamento do escoamento nessas situações, (ii) verificar a possibilidade de aumento das máximas vazões específicas de dimensionamento e (iii) desenvolver critérios de projeto. Seus resultados mostraram que o uso de aeradores em calhas em degraus é uma alternativa viável à aeração do escoamento e conseqüente redução na possibilidade de dano por cavitação. Porém, os autores não avaliaram as pressões sobre as faces dos degraus nessas situações. Inclusive, Terrier (2016) indicou que o impacto do jato do escoamento na calha em degraus altera a distribuição das pressões a jusante do sistema aerador, recomendando que as pressões sobre os degraus deveriam ser sistematicamente investigadas. Esta orientação foi atendida com as recentes e importantes contribuições de Priebe (2020), Novakoski (2021), entre outros.

A maioria dos pesquisadores estudou o posicionamento do sistema aerador nas proximidades da crista do vertedouro – como Pfister et al. (2006a, b), Zamora et al. (2008), Novakoski (2021), entre outros. Há também trabalhos que contemplam o posicionamento do sistema aerador mais a jusante na calha, porém sugerem, a montante dele, a existência de calha lisa – como a proposta de Terrier (2016). Sabe-se que a entrada de ar em sistemas aeradores está fortemente relacionada a valores do número de Froude do escoamento (PFISTER e HAGER, 2010a, b). Maiores números de Froude são atingidos no sentido de jusante na calha e, sendo assim, é de se esperar que a eficiência do sistema aerador será maior tanto mais a jusante estiver instalado. Por outro lado, dependendo da vazão específica escoada, a estrutura poderá estar suscetível aos danos da cavitação até

mesmo nas proximidades da crista e, nesse sentido, é adequada a instalação do sistema aerador na porção mais a montante da calha.

Nessa perspectiva, este trabalho procura contribuir na compreensão do comportamento das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus e das características do escoamento com aeração induzida, considerando a instalação de sistema aerador em diferentes regiões ao longo da calha de um vertedouro em degraus.

Tendo em vista o exposto, esta Tese visa colaborar principalmente com respostas às seguintes questões:

- i. A aeração induzida é capaz de alterar as pressões hidrodinâmicas sobre os degraus de um vertedouro, em comparação com a condição de aeração natural (isto é, a condição sem a presença de elementos aeradores)?
- ii. Há diferença entre o aspecto e as principais características do escoamento considerando a instalação de aerador em diferentes posições ao longo da calha em degraus?

A Tese está inserida no âmbito da avaliação de pressões hidrodinâmicas sobre os degraus do vertedouro e da entrada de ar no sistema aerador, por meio de estudo experimental em modelo físico. A coleta de dados foi realizada em uma instalação experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH), do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS). O modelo físico utilizado possui uma ogiva de perfil padrão *Waterways Experiment Station* (WES, U. S. Army) operada livremente, e 60 degraus (6 cm de altura cada) distribuídos ao longo de uma calha com 53° de inclinação com relação ao plano horizontal. O sistema aerador é formado por uma câmara de ar e um defletor. A câmara de ar constitui uma abertura na face vertical de um degrau, ao longo de toda a largura da calha. O defletor possui 10 mm de altura e ângulo de 7,6° com relação ao pseudofundo.

As vazões específicas ensaiadas abrangem a faixa de 0,054 até 0,50 m<sup>2</sup>/s em modelo. Todas as vazões ensaiadas configuram, na calha em degraus, a situação de escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*) com recirculação estável, de acordo com a nomenclatura indicada por Chanson (1994). A faixa de vazões específicas ensaiadas corresponde, em protótipo, a vazões de 2 a 16 m<sup>2</sup>/s (considerando a escala geométrica de 1:10 do modelo em relação ao protótipo, o que corresponde a degraus com 0,60 m de altura em protótipo), de 3 a 29 m<sup>2</sup>/s (escala de 1:15, degraus de 0,90 m) ou até 5 a 45 m<sup>2</sup>/s (escala de 1:20, degraus de 1,20 m).

A instalação experimental utilizada foi construída com recursos provenientes de Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (*P&D Análise da macroturbulência em vertedouros em degraus com aeração forçada*), financiado por Furnas Centrais Elétricas, em parceria com o IPH/UFRGS.

## 1.1 ESTRUTURA DO TEXTO

O texto está subdividido em capítulos, estruturados da seguinte forma:

- i. Capítulo 1: introduz o tema e expõe a temática da Tese;
- ii. Capítulo 2: apresenta os objetivos do trabalho;
- iii. Capítulo 3: traz uma revisão da literatura quanto à aeração natural sobre vertedouros em degraus e quanto ao problema da cavitação em estruturas hidráulicas. Este item também aborda as contribuições da literatura no que diz respeito a aeradores em vertedouros e à aeração induzida em calhas em degraus;
- iv. Capítulo 4: apresenta a metodologia proposta, com ênfase nas características da instalação experimental utilizada, nas configurações de ensaio sugeridas e nos métodos experimentais adotados na coleta de dados;
- v. Capítulo 5: destinado à apresentação e discussão dos resultados obtidos;
- vi. Capítulo 6: traz um exemplo de aplicação prática, voltado à análise do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeradores, contemplando tanto modelos de previsão propostos no presente trabalho quanto de outros pesquisadores;
- vii. Capítulo 7: expõe as principais conclusões obtidas, além de recomendações para trabalhos futuros;
- viii. Capítulo 8: apresenta as referências utilizadas;
- ix. Capítulo 9 até Capítulo 19: contêm os apêndices da Tese, que servem como apoio ao entendimento de parcelas do texto. Cada um dos apêndices é mencionado ao longo do texto, quando necessário.

## 2 OBJETIVOS

Os objetivos da tese subdividem-se em global e específicos e estão dispostos na sequência.

### 2.1 OBJETIVO GLOBAL

O objetivo global da Tese é, considerando vertedouro composto por calha em degraus e com sistema aerador posicionado em diferentes pontos ao longo da estrutura, quantificar as pressões hidrodinâmicas sobre os degraus e a entrada de ar pelo sistema aerador, bem como estabelecer modelos para sua previsão.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Identificar os pontos característicos do escoamento sobre vertedouros em degraus, através da análise visual do fenômeno, considerando as situações de aeração natural e induzida;
- ii. Analisar as pressões a que estão submetidas as faces vertical e horizontal dos degraus (distribuição longitudinal das pressões), nas proximidades da aresta externa do degrau, com ênfase à condição de aeração induzida com sistema aerador posicionado 1,30 m a jusante da crista do vertedouro (no degrau nº10)<sup>3</sup>;
- iii. Estabelecer equações para estimativa dos parâmetros do escoamento relativos ao aerador – a saber, o comprimento do jato e o coeficiente de entrada de ar;
- iv. Estabelecer modelo de previsão de pressões na condição de escoamento sobre uma calha em degraus sujeita à aeração induzida;
- v. Avaliar a concentração de ar no fundo do escoamento (isto é, nas proximidades dos degraus da calha), com base em modelos de previsão estabelecidos por outros autores.

---

<sup>3</sup> A justificativa para a escolha do posicionamento do sistema aerador na calha consta no APÊNDICE B, conforme indicado em itens seguintes correspondentes.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo expõe as principais pesquisas relacionadas a escoamentos sobre vertedouros em degraus, especialmente aquelas que dizem respeito a elementos aeradores e ao estudo de pressões e de concentração de ar no escoamento.

No item 3.1 são abordadas as contribuições mais relevantes no que diz respeito à aeração natural sobre vertedouros em degraus. Em 3.2 trata-se do fenômeno da cavitação e, na sequência, no item 3.3 expõe-se de que forma a aeração pode ser utilizada como alternativa para se evitar danos causados pela cavitação. O item 3.4 diz respeito ao escoamento sobre vertedouros com a inserção de aeradores, ao passo que em 3.5 constam as contribuições ao estudo do efeito de escala em modelos físicos reduzidos. Finalmente, no item 3.6 apresentam-se as lacunas atuais do conhecimento com as quais esta Tese procura contribuir.

#### 3.1 AERAÇÃO NATURAL EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS

Em vertedouros em degraus, diz-se que o escoamento está sujeito à ação da aeração natural quando a entrada de ar no escoamento acontece naturalmente, isto é, sem a presença de elementos aeradores ao longo da calha. Nesses casos, a entrada de ar inicia quando a turbulência do escoamento é capaz de superar os efeitos da tensão superficial entre o ar e a água (CHANSON, 1993).

Chanson (1993, p. 429) descreveu o escoamento sobre vertedouros em degraus, sujeitos à aeração natural, conforme segue:

[...] na região de entrada no vertedouro, o escoamento é suave e transparente. Entretanto, nas proximidades da superfície sólida da estrutura, a turbulência inicia e a camada limite turbulenta se desenvolve até alcançar a superfície livre. A partir de então, a turbulência do escoamento ocasionará o processo de aeração natural. O local onde a entrada de ar no escoamento inicia é chamado de ponto de início de aeração. A jusante desse ponto, tem-se um escoamento formado por uma mistura de ar e água. Mais a jusante, o escoamento se torna uniforme, de modo que a profundidade, a concentração de ar e o perfil de velocidades não variam ao longo do canal.<sup>4</sup>

No escoamento uniforme, além dos parâmetros indicados por Chanson (1993), pode-se destacar que a pressão hidrodinâmica sobre os degraus da calha também tende a se manter praticamente constante.

Na seção em que a espessura da camada limite turbulenta se iguala à profundidade do escoamento tem-se o ponto de início de aeração. Na condição de aeração natural, o início da aeração desloca-

---

<sup>4</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.

se para jusante à medida que a vazão aumenta e, mantendo-se a vazão constante, desloca-se para montante com o aumento da altura do degrau (TOZZI, 1992).

Devido à recirculação do fluxo nas proximidades dos degraus, o escoamento sobre essas estruturas assume características hidrodinâmicas. Em razão do número de equações relevantes envolvidas, estudos teóricos e numéricos de escoamentos turbulentos compostos por ar e água são complexos (CHANSON, 2009). Por esse motivo, até o momento, o conhecimento de parâmetros específicos do escoamento só é possibilitado por meio experimental – vale mencionar, porém, que há modelos numéricos capazes de simular escoamentos bifásicos sobre vertedouros em degraus, e trabalhos nesse âmbito já foram e continuam sendo desenvolvidos, como o de Arantes (2007), Tassinari et al. (2020) e Tassinari (2022), por exemplo. Na sequência, apresentam-se as principais conclusões (provenientes de trabalhos experimentais em modelos físicos) envolvendo medições de concentração de ar (item 3.1.1) e de pressões (item 3.1.2) em vertedouros em degraus sujeitos à aeração natural.

Os parâmetros utilizados nas equações subsequentes estão representados na Figura 3.1, que apresenta uma parcela de um vertedouro em degraus com escoamento submetido à aeração natural.

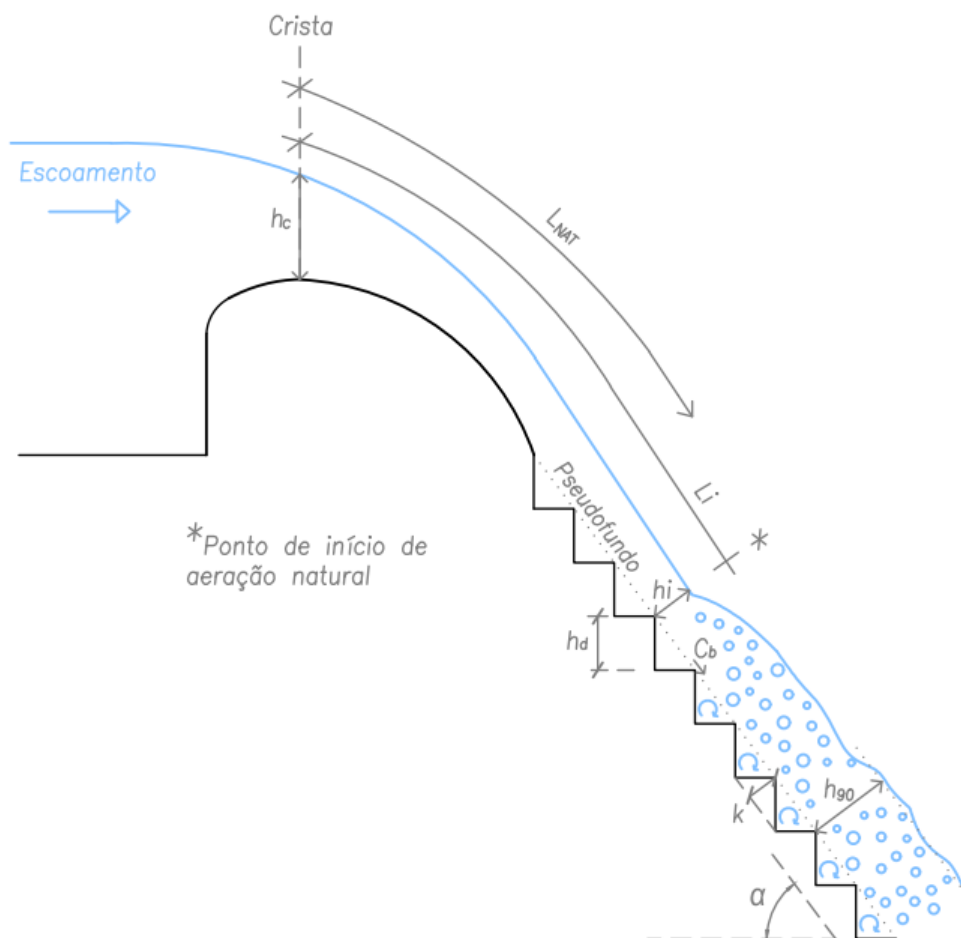


Figura 3.1 – Representação esquemática, em vista lateral, dos parâmetros para vertedouro em degraus submetido à aeração natural.



### 3.1.1 Concentração de ar no escoamento

O escoamento sobre vertedouros sem a presença de elementos aeradores possui duas regiões distintas no que diz respeito à aeração no escoamento: as regiões não aerada e aerada, localizadas, respectivamente, a montante e a jusante do ponto de início de aeração. De acordo com Terrier (2016), a região de início de aeração é a mais exposta aos riscos da cavitação (tema abordado no item 3.2), uma vez que, a montante dessa região, o risco é menor devido às menores velocidades do escoamento, ao passo que a jusante a estrutura está protegida pela ação da aeração (assunto discutido no item 3.3). Em termos de concentração de ar, o ponto de início de aeração é definido como o local onde a concentração de ar no fundo do escoamento ( $C_b$ ), próximo ao pseudofundo da calha do vertedouro (ou seja, junto aos degraus), é igual a 1%, isto é,  $C_b = 0,01$  (BOES e HAGER, 2003b).

A jusante do ponto de início de aeração, o ar incorporado à água ocasiona o aumento na profundidade do escoamento, além do aumento na concentração média de ar ( $C_a$ ) e em  $C_b$ . O parâmetro  $C_a$  é definido matematicamente por meio da Equação 3.1, e representa a concentração de ar média no escoamento, desde o pseudofundo da calha até a profundidade onde a concentração pontual de ar ( $C$ ) é igual a 90% ( $h_{90}$ ), isto é, onde  $C = 0,90$ . É prática comum a utilização da profundidade  $h_{90}$  como limite superior da integração na Equação 3.1 (MATOS, 1990; TERRIER 2016) uma vez que a medição da concentração de ar no escoamento não é precisa em regiões onde  $C > 0,90$  (CHANSON, 1988).

$$C_a = \frac{1}{h_{90}} \int_0^{h_{90}} C dh \quad \text{Equação 3.1}$$

onde

$C_a$  é a concentração de ar média no escoamento [%];

$h_{90}$  é a profundidade do escoamento onde  $C = 0,90$  [m];

$C$  é a concentração de ar pontual no escoamento [%].

Diversos pesquisadores analisaram o comportamento dos perfis de concentração de ar ao longo de vertedouros em degraus. Na Tabela 3.1, apresentam-se algumas das principais equações para estimativa da concentração de ar no escoamento, considerando apenas os estudos que incluem canais com inclinação  $\alpha$  da ordem de  $50^\circ$ . Nessa tabela, o indicado como “escoamento aerado” diz respeito à região a jusante do ponto de início de aeração e a montante da região de “escoamento quase uniforme” que, por sua vez, corresponde à região onde a profundidade, a velocidade, a pressão e a concentração de ar no escoamento são praticamente constantes ao longo da calha. Para facilitar o entendimento do texto, seguindo também o utilizado na maioria dos trabalhos consultados, optou-se por utilizar o parâmetro  $C_{ai}$  como a concentração de ar média no ponto de início de aeração, ao passo que  $C_{au}$  e  $C_{bu}$  representam, respectivamente, a concentração de ar média e a concentração de ar no fundo do escoamento, na região onde o escoamento é quase uniforme.

Tabela 3.1 – Equações para cálculo da concentração de ar no escoamento sobre vertedouro em degraus submetido à aeração natural.

Região	Autor (ano)	Equação	
Início de aeração	Matos (1999)	$C_{ai} = 0,163 F_k^{0,154}$	Equação 3.2 <sup>5</sup>
	Matos (1999) e Meireles et al. (2012)	$C_{ai} \approx 0,20$	Equação 3.3 <sup>6</sup>
	Boes e Hager (2003b)	$C_{ai} = 0,0012 (240 - \alpha)$	Equação 3.4 <sup>7</sup>
Escoamento aerado	Matos (1999)	$C_a = 0,191 + 0,488 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 0,253 L'_{NAT}}} \right)$	Equação 3.5 <sup>8</sup>
	Pfister e Hager (2011)	$\frac{C_a}{C_{au}} = \tanh \left( 1,7 \frac{L_{NAT}}{L_i} - 1 \right)$	Equação 3.6 <sup>9</sup>
	Matos (1999)	$C_b = \frac{0,381}{1 + \left( \frac{L'_{NAT}}{14,189} \right)^{-1,232}}$	Equação 3.7 <sup>10</sup>
	Boes e Hager (2003b)	$C_b = 0,015 L'_{NAT} \sqrt{\tan \alpha / 2}$	Equação 3.8 <sup>11</sup>
Escoamento quase uniforme	Boes (2000 <sup>12</sup> , apud Pfister e Hager, 2011)	$C_{au} = 0,6 - 0,00611 F_{hd}$	Equação 3.9 <sup>13</sup>
	Terrier (2016)	$C_{au} \approx 0,50 \text{ a } 0,55$	Equação 3.10 <sup>14</sup>
	Boes (2000, apud Terrier, 2016)	$C_{bu} = 0,268 - 0,000569 F_{hd}$	Equação 3.11 <sup>15</sup>
	Terrier (2016)	$C_{bu} \approx 0,32$	Equação 3.12 <sup>16</sup>

onde

$F_k$  é o número de Froude relacionado à rugosidade do degrau, definido de acordo com a Equação 3.13;

$F_{hd}$  é o número de Froude relacionado à altura do degrau, definido de acordo com a Equação 3.14;

$\alpha$  é o menor ângulo formado entre a calha inclinada do vertedouro e o plano horizontal [graus];

$L'_{NAT}$  é uma coordenada adimensional, definida de acordo com a Equação 3.15;

$L_{NAT}$  é a distância longitudinal à calha, desde a crista até o ponto em análise, conforme Figura 3.1 [m];

$L_i$  é a distância longitudinal à calha, desde a crista até o ponto de início de aeração, conforme Figura 3.1 [m].

<sup>5</sup> Obtida com base em experimentos em modelo físico com  $\alpha \approx 50^\circ$ . As vazões específicas testadas incluem a faixa de 0,08 a 0,20 m<sup>2</sup>/s.

<sup>6</sup> Para Matos (1999), mesmas observações que as da Equação 3.2. Para Meireles et al. (2012), modelo físico com  $\alpha \approx 50^\circ$  e vazões específicas na faixa de 0,05 a 0,20 m<sup>2</sup>/s.

<sup>7</sup> Válida para  $26^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ .

<sup>8</sup> Mesmas observações que as da Equação 3.2. O autor também define outras duas equações para  $C_a$ , válidas para intervalos distintos de  $L'_{NAT}$  ao longo da calha.

<sup>9</sup> Obtida com base em experimentos em modelo físico com  $\alpha = 30^\circ$  e  $50^\circ$ .

<sup>10</sup> Mesmas observações que as da Equação 3.2.

<sup>11</sup> Válida para  $26^\circ \leq \alpha \leq 55^\circ$ .

<sup>12</sup> Boes, R. M. (2000). "Zweiphasenströmung und Energieumsetzung an Grosskaskaden." VAW Mitteilung, 166, H.-E. Minor, ed., ETH, Zurique, Suíça (em alemão).

<sup>13</sup> Obtida com base em experimentos em modelo físico com  $\alpha = 30^\circ$  e  $50^\circ$ .

<sup>14</sup> Obtida com base em experimentos em modelo físico com  $\alpha = 50^\circ$ . As vazões específicas testadas incluem a faixa de 0,20 a 0,48 m<sup>2</sup>/s.

<sup>15</sup> Válida para  $\alpha = 50^\circ$ .

<sup>16</sup> Mesmas observações que as da Equação 3.10.

$$F_k = \frac{q}{\sqrt{g \operatorname{sen} \alpha k^3}} \quad \text{Equação 3.13}$$

$$F_{h_d} = \frac{q}{\sqrt{g \operatorname{sen} \alpha h_d^3}} \quad \text{Equação 3.14}$$

onde

$q$  é a vazão específica, ou vazão por metro de largura [ $\text{m}^2/\text{s}$ ];

$g$  é a aceleração da gravidade [ $\text{m}/\text{s}^2$ ];

$k$  é a rugosidade do degrau (ver Figura 3.1) [m];

$h_d$  é a altura do degrau (dimensão da face vertical do degrau) [m].

$$L'_{NAT} = \frac{L_{NAT} - L_i}{h_i} \quad \text{Equação 3.15}$$

onde

$h_i$  é a profundidade do escoamento (de água) no ponto de início de aeração [m].

Conforme indicado na Tabela 3.1, Matos (1999) concluiu que  $C_{ai}$  é função de  $F_k$ , resultando no valor médio de 0,20 (para  $0,08 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ ). O mesmo comportamento foi reiterado por Meireles et al. (2012). De acordo com Boes e Hager (2003b),  $C_{ai}$  depende apenas da inclinação da calha do vertedouro (Equação 3.4) e, desse modo, para vertedouros com  $\alpha \approx 50^\circ$ ,  $C_{ai} \approx 0,23$ .

Para a região de escoamento aerado, Pfister e Hager (2011), com base nos resultados da Equação 3.6, indicaram que a região em que  $C_a \approx C_{au}$  inicia na posição  $L_{NAT} \approx 2 L_i$ . Apoiado nos dados que deram origem à Equação 3.7, Matos (1999) concluiu que em seções localizadas a cerca de seis vezes a altura do escoamento na seção de início de aeração (isto é,  $6 h_i$ ), a contar da seção de início de aeração,  $C_b$  já é superior ao valor mínimo necessário para que não ocorra risco de danos por cavitação (tais valores mínimos serão indicados no item 3.3). Terrier (2016), de acordo com medições de concentração de ar, indicou que a região de escoamento quase uniforme inicia em  $L_{NAT} \approx L_i + 20 h_c$  (sendo a  $h_c$  a profundidade crítica do escoamento). Além disso, o autor concluiu que o valor de  $C_{au}$  para calha em degraus é equivalente ao de calha lisa.

Dado que as equações que estimam  $C_b$  foram desenvolvidas com base em estudos experimentais, pode-se admitir que ocorram diferenças significativas nos resultados de cada autor, em consequência das distinções nas considerações e nos equipamentos adotados. Matos (1999), por exemplo, obteve a Equação 3.7 com base em medições de concentração pontual de ar à distância de 0,32 cm do pseudofundo da calha. O autor também desenvolveu outras duas equações semelhantes à Equação 3.7, mas obtidas com base em dados coletados a distâncias de 0,82 e 1,32 cm da calha. Assim, por exemplo, para a mesma posição  $L'_{NAT}$ , enquanto a Equação 3.7 resulta em  $C_b \approx 0,05$ , o uso da equação desenvolvida para a distância de 1,32 cm do fundo conduz a  $C_b \approx 0,07$ , diferenças que podem ser consideráveis quando se trata de risco aos danos decorrentes da cavitação (assunto discutido no item 3.3).

Terrier (2016), amparado nos resultados experimentais de modelo físico reduzido de vertedouro em degraus, mencionou que a menor concentração de ar no escoamento está localizada no

pseudofundo da calha, na extremidade inferior do perfil de profundidade do escoamento. Na impossibilidade de se medir a concentração de ar mínima no escoamento, assume-se que esta é equivalente à  $C_b$  que, por sua vez, deve ser medida o mais próximo possível do fundo do escoamento. Terrier (2016) mediu  $C_b$  cerca de 2 a 3 mm do pseudofundo da calha.

Na região de escoamento quase uniforme, Boes (2000, apud PFISTER e HAGER, 2011; TERRIER, 2016) sugeriu que a concentração de ar é função de  $F_{hd}$ , adimensional relacionado à altura do degrau ( $h_d$ ) e definido de acordo com a Equação 3.14. Para situações de mesma vazão específica  $q$  e ângulo  $\alpha$ , portanto, a Equação 3.9 e a Equação 3.11 indicam que a concentração de ar no escoamento aumenta com o aumento da altura do degrau. Ademais, a Equação 3.9 sugere que  $C_{au}$  é sempre próximo ou inferior a 0,60, ao passo que a Equação 3.11 indica  $C_{bu}$  igual ou inferior a 0,27, aproximadamente, valores próximos aos definidos por Terrier (2016) e apresentados na Equação 3.10 e na Equação 3.12.

A aeração do escoamento ao longo da calha em degraus tem como vantagem a redução dos possíveis danos oriundos do fenômeno de cavitação (conforme será discutido no item 3.3). Dependendo da velocidade atingida pelo escoamento, as pressões hidrodinâmicas que ocorrem na superfície ou na extremidade dos degraus podem atingir valores inferiores à pressão de vapor, podendo causar danos severos à superfície do concreto (BOES e HAGER, 2003b). Por esse motivo, é importante não apenas conhecer o comportamento dos perfis de concentração de ar, mas também as pressões atuantes na superfície dos degraus do vertedouro, assunto abordado no tópico seguinte.

### 3.1.2 Pressões sobre os degraus

Embora não apresente dados e discussão amplos acerca do comportamento das pressões ao longo da extensão da calha, pode-se destacar o estudo efetuado por Houston (1987) como um dos pioneiros na análise do comportamento de tal grandeza em vertedouros em degraus. O autor mediu as pressões médias por meio de piezômetros, instalados, principalmente, na face horizontal dos degraus, para a vazão específica  $q \approx 0,04 \text{ m}^2/\text{s}$  (em modelo físico). Houston (1987, p. 5-7) conclui que “nem as pressões de impacto e nem as pressões negativas foram excessivas” e que tais pressões “não causarão danos por cavitação”.

Deve-se destacar que, além da vazão específica testada ser baixa, a maioria das tomadas de pressão analisadas por Houston (1987) estava localizada na face horizontal dos degraus, onde, conforme destacado pelo próprio autor, devem ocorrer as “pressões de impacto” na estrutura. Desse modo, entende-se que a maior preocupação do autor era analisar as pressões positivas na face horizontal dos degraus, motivo pelo qual pouca ênfase foi dada no que diz respeito ao conhecimento das pressões negativas na estrutura.

Possivelmente, os estudos experimentais mais conhecidos envolvendo a análise de pressões em vertedouros em degraus são, até o momento, os desenvolvidos por Sánchez-Juny e Dolz (2005), Sánchez-Juny et al. (2007, 2008)<sup>17</sup> e Amador et al. (2009). Entretanto, diversos pesquisadores têm estudado sistematicamente o comportamento das pressões nessas estruturas, como Tozzi (1992), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Gomes (2006), entre outros. Mais recentemente, nos trabalhos de Canellas (2020) e Matos et al. (2022), têm-se importantes contribuições especialmente no que diz respeito ao estabelecimento de modelos de previsão de pressões hidrodinâmicas sobre os degraus. As principais características dos ensaios e contribuições dos referidos autores estão condensadas na Tabela 3.2 e brevemente discutidas na sequência. Destaca-se que todos os trabalhos mencionados dizem respeito à condição de aeração natural no escoamento.

Conforme indicado na Tabela 3.2, a maior parte das contribuições relacionadas à análise de pressões sobre vertedouro em degraus reitera a ocorrência predominante de pressões positivas na face horizontal e negativas na vertical, comportamento já identificado por pesquisadores pioneiros – como Houston (1987) e Tozzi (1992), por exemplo.

Devido à identificação de pressões negativas significativas, na face vertical dos degraus, e de uma considerável variação de valores de pressão (compreendidos entre -0,50 e 0,40 m, em termos de altura de coluna piezométrica), Tozzi (1992) sugeriu a “realização de estudo mais abrangente relacionado à ocorrência de pressões negativas nos degraus” (TOZZI, 1992; p. 248). Essa indicação foi atendida com os estudos subsequentes, especialmente dos autores indicados na Tabela 3.2.

Em razão das contribuições de Sánchez-Juny (2001), Gomes (2006), Amador et al. (2009), entre outros, é consenso de que as pressões extremas<sup>18</sup> ocorrem nas proximidades da aresta externa dos degraus. Além disso, as maiores flutuações de pressão também ocorrem nas proximidades da aresta externa dos degraus, em conformidade com as contribuições apresentadas na Tabela 3.2.

Os resultados de alguns autores, dentre eles Gomes (2006) e Amador et al. (2009), sugerem que a zona junto à região de afloramento da camada limite é o local onde os esforços mais críticos são registrados (isto é, as pressões mais significativas, em módulo). Os resultados obtidos por Sánchez-Juny e Dolz (2005), Canellas (2020) e Matos et al. (2022) apontam que os esforços mais significativos foram observados a montante do ponto de início de aeração natural no escoamento.

---

<sup>17</sup> Baseados nos resultados obtidos na dissertação de Mestrado cuja referência é Sánchez-Juny (2001).

<sup>18</sup> As pressões extremas são caracterizadas pelo percentil  $x\%$  ( $P_{x\%}$ ), parâmetro estatístico que representa a probabilidade de não excedência dos valores de pressão (isto é, a probabilidade de ocorrência de valores de pressão inferiores àquele respectivo valor).

Tabela 3.2 – Contribuições ao estudo de pressões sobre vertedouros em degraus submetidos à aeração natural.

Autor (ano)	Instalação experimental	Análises principais	Principais conclusões
Tozzi (1992)	Modelo físico com $\alpha \approx 53^\circ$ Altura dos degraus ( $h_d$ ) de cerca de 0,01 m a 0,10 m; Máxima vazão específica ( $q_{max}$ ) igual a 0,20 m <sup>2</sup> /s.	Pressões nas proximidades da aresta externa dos degraus. Foram medidas pressões médias nas faces verticais e horizontais e pressões instantâneas na face vertical de dois degraus.	Predominância de pressões positivas na face horizontal (em virtude do impacto do escoamento) e pressões negativas na face vertical (devido à formação de vórtices nessa região).
Sanagiotto (2003) Dai Prá (2004)	$\alpha \approx 53^\circ$ e $\alpha = 45^\circ$ $h_d = 0,03\text{ m}, 0,06\text{ m e } 0,09\text{ m}$ $q_{max} = 0,70\text{ m}^2/\text{s}$	Pressões médias (com piezômetros e transdutores) ao longo das faces vertical e horizontal do degrau.	Faces horizontais e verticais do degrau estão sujeitas, de modo geral, a pressões positivas e negativas, respectivamente; As pressões médias máxima e mínima ocorrem nas proximidades da aresta externa das faces horizontal e vertical, respectivamente.
Sánchez-Juny e Dolz (2005)	$\alpha \approx 51^\circ$ $h_d = 0,10\text{ m}$ $q_{max} = 0,333\text{ m}^2/\text{s}$	Pressões médias e extremas (percentil 95% e 5%) no eixo de simetria da face horizontal dos degraus.	As pressões médias são positivas em toda a extensão calha; As pressões máximas (percentil 95%) e mínimas (percentil 5%) medidas estão localizadas a montante da região de início da aeração.
Gomes (2006)	Idem à Sanagiotto (2003).	Pressões médias, extremas (percentil 99,9% e 0,1%) e flutuação de pressão ao longo das faces vertical e horizontal do degrau.	Maiores flutuações de pressões ocorrem na extremidade externa dos degraus; Os valores extremos absolutos foram atenuados em seções a jusante do ponto de início da aeração natural no escoamento.
Sánchez-Juny et al. (2007)	Idem à Sánchez-Juny e Dolz (2005).	Pressões médias e extremas (percentil 95% e 5%) ao longo das faces vertical e horizontal de dois degraus representativos do escoamento.	Maiores e menores pressões ocorrem nas proximidades da aresta externa do degrau, respectivamente, na face horizontal e vertical; Identificação de duas zonas distintas, no que diz respeito aos esforços no degrau, sendo <ul style="list-style-type: none"> <li>i) a região próxima da aresta externa do degrau, que é caracterizada pelo impacto do jato;</li> <li>ii) e a região interna do degrau, que é dominada pela recirculação do escoamento.</li> </ul>

Continua na página seguinte.

Autor (ano)	Instalação experimental	Análises principais	Principais conclusões
Sánchez-Juny et al. (2008)	Idem à Sánchez-Juny e Dolz (2005).	Idem à Sánchez-Juny et al. (2007).	<p>A porcentagem do tempo durante a qual ocorreram pressões negativas na face horizontal não excede 20% do tempo total, enquanto na face vertical atinge 80%;</p> <p>Nas faces horizontais, a porcentagem do tempo em que ocorrem pressões negativas aumenta com o aumento da vazão;</p> <p>Em contrapartida, conforme a vazão aumenta, a face vertical do degrau está sujeita a pressões negativas por um intervalo de tempo menor.</p>
Amador et al. (2009)	$\alpha \approx 51^\circ$ $h_d = 0,07 \text{ m}$ $q_{max} = 0,333 \text{ m}^2/\text{s}$	Pressões médias e extremas (percentil 0,1%), flutuação de pressão e histograma de pressões dinâmicas ao longo das faces vertical e horizontal, em degraus representativos do escoamento.	<p>As maiores pressões foram obtidas nas proximidades da aresta externa da face horizontal do degrau;</p> <p>Na face vertical obtiveram-se pressões médias próximas de zero, entretanto as flutuações de pressão foram significativas. Sugere-se que a região mais externa da face vertical do degrau é crítica quanto a danos provocados pela cavitação;</p> <p>Comportamentos distintos nos valores de pressão se comparadas as zonas aerada e não aerada do escoamento.</p>
Canellas (2020)	$\alpha \approx 53^\circ$ $h_d = 0,06 \text{ m e } 0,09 \text{ m}$ $q_{max} = 0,44 \text{ m}^2/\text{s}$	Distribuição longitudinal (em diferentes degraus ao longo da calha) de pressões extremas mínimas (percentil 0,1%) e máximas (percentil 99,9%), nas proximidades da aresta externa dos degraus, nas faces vertical e horizontal.	<p>As pressões mínimas medidas na face vertical dos degraus ocorrem, de modo geral, cerca de 15 a 30% a montante do ponto de início de aeração;</p> <p>O comportamento das pressões extremas mínimas e máximas pode ser representado por pontos característicos (cuja estimativa se dá através da aplicação de relações adimensionais em função de <math>h_c</math>, <math>h_d</math>, <math>F_k</math>, dentre outros).</p>
Matos et al. (2022)	$\alpha \approx 53^\circ$ $h_d = 0,06 \text{ m e } 0,09 \text{ m}$ $q_{max} = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$	Distribuição longitudinal das pressões médias, das flutuações de pressão e das pressões extremas (percentil 0,1%, 1%, 5%, 95%, 99% e 99,9%) nas proximidades da aresta externa dos degraus, nas faces vertical e horizontal.	<p>De modo geral, há um incremento (em módulo) nos valores dos coeficientes de pressão imediatamente a montante do ponto de início de aeração natural, e um decréscimo a jusante.</p> <p>A distribuição das pressões extremas pode ser representada por expressões empíricas, função do coeficiente de pressão (<math>C_p</math>) e da posição longitudinal à calha <math>L'_{NAT}</math>.</p> <p>O índice de cavitação crítico<sup>19</sup> nas proximidades do ponto de início de aeração é da ordem de 0,70 a 0,80.</p>

<sup>19</sup> Conceito apresentado no item 3.2.1.

Gomes (2006) indicou que a magnitude das pressões está diretamente associada, dentre outras características, à quantidade de ar presente no escoamento. De fato, Amador et al. (2009) identificaram comportamentos distintos, no que diz respeito às pressões sobre os degraus, nas regiões aerada e não aerada do escoamento. Além disso, Amador et al. (2009) mencionaram que as flutuações de pressão são maiores na zona não aerada do escoamento, se comparadas com a zona aerada. De acordo com os autores, a presença de ar no escoamento atua no sentido de amortecer as pressões sobre os degraus.

Vale salientar, com relação à Tabela 3.2, as distinções entre os percentis extremos de pressões analisados pelos autores: enquanto Sánchez-Juny et al. (2007, 2008) analisaram o percentil 5%, Gomes (2006), Amador et al. (2009) e Canellas (2020) consideraram o de 0,1%. Mais recentemente, Matos et al. (2022) optaram por avaliar a faixa de percentis de 0,1%, 1%, 5%, 95%, 99% e 99,9%. Baseado em resultados de modelo e protótipo, Lopardo (2002) indicou o percentil de 0,1% como valor representativo na avaliação do potencial de cavitação em escoamentos caracterizados pela formação do ressalto hidráulico. Uma vez que não há estudo semelhante desenvolvido em escoamentos sobre vertedouros em degraus, é prática comum o uso da recomendação de Lopardo (2002) também nesses casos.

No que diz respeito ao estabelecimento de modelos de previsão de pressão, podem-se destacar as recentes contribuições de Canellas (2020) e Matos et al. (2022). Na sequência será apresentado, de forma resumida, o modelo de previsão de pressões associadas ao escoamento sobre vertedouros em degraus e sujeito à aeração natural, estabelecido por Matos et al. (2022).

O modelo de Matos et al. (2022) sugere que a distribuição das pressões do escoamento sobre o vertedouro em degraus é bem representada pelo coeficiente de pressão ( $C_{px\%}$ , Equação 3.16), onde “x%” representa a probabilidade de não excedência das pressões, tendo sido selecionadas as probabilidades de 0,1%, 1% e 5% ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ) como representativas das pressões extremas mínimas na face vertical dos degraus. Assim, os autores propõem o uso da Equação 3.17 para previsão das pressões extremas sobre os degraus, função da posição  $L'_{NAT}$  ao longo da calha (ver Equação 3.15).

$$C_{px\%} = \frac{P_{x\%}/\gamma}{V^2/2g} \quad \text{Equação 3.16}$$

$$C_{px\%} = \frac{a + bL'_{NAT}}{1 + cL'_{NAT} + dL'^2_{NAT}} \quad \text{Equação 3.17}$$

onde

$C_{px\%}$  é o coeficiente de pressão, associado à probabilidade de não excedência x%;

$P_{x\%}$  é a pressão do escoamento, associada à probabilidade de não excedência x% [Pa];

$\gamma$  é o peso específico da água [N/m<sup>3</sup>];

$V$  é a velocidade média do escoamento [m/s];

$a, b, c$  e  $d$  são constantes.



Por sua vez, para determinação da velocidade média do escoamento  $V$ , é necessário o conhecimento das profundidades do escoamento não aerado. Para tal, Matos et al. (2022) sugerem os modelos de Matos (2000), Meireles et al. (2005) e Meireles et al. (2012), a depender da posição ao longo da calha.

Os coeficientes de ajuste da Equação 3.17, expostos na Tabela 3.3, foram estabelecidos por Matos et al. (2022) a partir da avaliação de dados experimentais adquiridos em três modelos físicos, tendo resultado em coeficientes de determinação ( $R^2$ ) da ordem de 0,75 a 0,80, sendo válidos, nesse caso, para o intervalo  $-25 \leq L'_{NAT} \leq 50$ .

Tabela 3.3 – Coeficientes de ajuste da Equação 3.17.

	a	b	c	d
$C_{p0,1\%}$	-0,6507	-0,0094	0,0421	0,0024
$C_{p1\%}$	-0,4210	-0,0072	0,0440	0,0024
$C_{p5\%}$	-0,2626	-0,0054	0,0459	0,0023

Além da previsão dos valores extremos mínimos (associados às probabilidades de não excedência de 0,1%, 1% e 5%), Matos et al. (2022) também apresentaram coeficientes de ajuste associados às pressões máximas (para probabilidades de não excedência de 95%, 99% e 99,9%, na face horizontal dos degraus), nesse caso, válido para  $0 \leq L'_{NAT} \leq 50$ , tendo resultado em  $R^2 \approx 0,50$ .

O conhecimento das pressões e dos perfis de concentração de ar em vertedouros (assuntos abordados nos tópicos anteriores) tem como objetivo a avaliação da possibilidade da ocorrência do fenômeno da cavitação no escoamento e consequente dano na estrutura. Assim, o tópico seguinte aborda aspectos relacionados à cavitação em estruturas hidráulicas, com ênfase em vertedouros.

## 3.2 CAVITAÇÃO

Há indícios de que os estudos sobre o fenômeno da cavitação iniciaram com observações envolvendo o comportamento incomum que ocorria em hélices propulsoras de embarcações, e de que Reynolds (1873<sup>20</sup>, apud BRENNEN, 1995) está entre os pesquisadores pioneiros no assunto. Entretanto, o termo “cavitação” foi proposto por R. E. Froude<sup>21</sup>, ao identificar que ocorriam cavidades de vapor de água com o movimento das hélices, e que parte da potência da máquina estava sendo consumida na formação dessas cavidades e não na propulsão da embarcação (PARSONS, 1900).

A ocorrência do fenômeno da cavitação está relacionada com a vaporização do líquido quando submetido a pressões inferiores à pressão de vapor. Embora sejam semelhantes no que diz respeito ao fenômeno, a cavitação não deve ser confundida com o processo de ebulição, dado que este é

<sup>20</sup> Reynolds, O. (1873). The causes of the racing of the engines of screw steamers investigated theoretically and by experiment. Transactions Institute Naval Architects, 14, 56-67.

<sup>21</sup> Robert Edmund Froude (1846 – 1924), filho de William Froude (1810 – 1879), este último a quem se atribui o conhecido número de Froude.

um processo de passagem do estado líquido para o estado de vapor, a partir do aumento da temperatura do líquido, mantendo-se a pressão constante.

Ocorrido o processo de cavitação, caso a pressão local se mantiver próxima da pressão de vapor, a cavidade atingirá um diâmetro crítico e explodirá (TULLIS, 1982). Por outro lado, caso a pressão na vizinhança for superior à pressão de vapor, a cavidade implodirá – isto é, sofrerá um colapso de fora para dentro. Nas situações em que a implosão das bolhas ocorre nas proximidades de uma fronteira sólida, pequenas porções de material podem ser removidas, resultando, com o passar do tempo, em erosões de magnitude significativa (PETERKA, 1953). Devido à dinâmica do escoamento em estruturas hidráulicas, o fenômeno da cavitação geralmente está associado à implosão das bolhas de vapor e, conseqüentemente, à ocorrência de ruídos, vibrações e danos.

Existem duas classificações de cavitação descritas na literatura: a gasosa e a vaporosa. De acordo com Tullis (1982, p. 2):

A cavitação gasosa ocorre quando ou existe uma considerável quantidade de ar em suspensão na água ou quando o processo de cavitação é suficientemente lento, permitindo o aumento da quantidade de ar no interior da cavidade de vapor [...]. A taxa de crescimento e colapso da bolha é muito mais lenta para a cavitação gasosa [...], o processo não é tão violento e normalmente não deverá criar uma situação de algum interesse. Se existir pouquíssimo ar no líquido, de forma que a cavidade consista quase exclusivamente de vapor, as taxas de crescimento e de colapso e as pressões geradas devido ao colapso da cavidade serão extremamente elevadas e poderão causar danos de monta. Este caso é denominado cavitação vaporosa e se constitui no tipo de cavitação que deverá ser de interesse prático ao engenheiro.

Sendo assim, a cavitação associada a danos em estruturas hidráulicas é a vaporosa. Entretanto, é a cavitação gasosa que está associada às técnicas que permitem a supressão da cavitação vaporosa, através da aeração do fluido (TULLIS, 1982). Desse modo, entende-se que o processo de aerar o escoamento atua como modificador do tipo de cavitação associado ao fenômeno, passando de vaporosa para gasosa. A tentativa de evitar danos decorrentes da cavitação por meio de técnicas de aeração no escoamento é discutida no item 3.3, ao passo que o item subsequente aborda as questões relacionadas à cavitação vaporosa.

### 3.2.1 Cavitação vaporosa

Os requisitos fundamentais para a ocorrência da cavitação são, respectivamente (TULLIS, 1982; FALVEY, 1990):

- i. bolhas de ar microscópicas ou impurezas na água, que servem como base para a vaporização do líquido;

- ii. o decréscimo da pressão, em alguma região do líquido, a valores próximos ou inferiores à pressão de vapor e
- iii. o subsequente aumento da pressão nas proximidades da cavidade, de forma a provocar a sua implosão.

A dinâmica do colapso das cavidades (ou bolhas) de vapor está descrita em Falvey (1990). O processo consiste, basicamente, no decréscimo do diâmetro da cavidade até o seu colapso (ou implosão). A implosão da bolha ocasiona uma onda de choque na região e, caso aconteça nas proximidades de uma superfície sólida, poderá ocasionar a erosão do material.

A causa principal da ocorrência da cavitação são irregularidades na superfície sólida em contato com o escoamento (FALVEY, 1990). Tais irregularidades proporcionam o lançamento do escoamento sobre a superfície e, conseqüentemente, favorecem a ocorrência de pressões de sucção na região. Caso os requisitos fundamentais para a ocorrência da cavitação sejam satisfeitos, ocorrerá erosão imediatamente a jusante da irregularidade, conforme esquema apresentado na Figura 3.2.

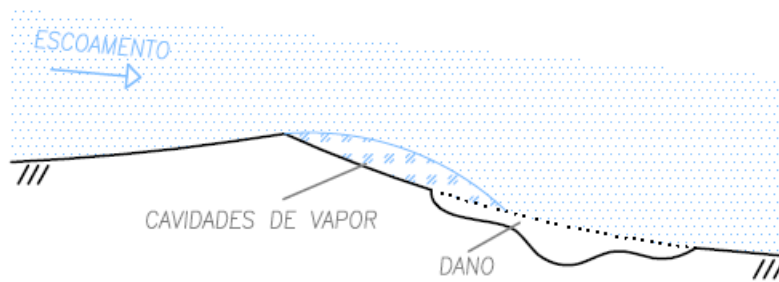


Figura 3.2 – Esquema, em vista lateral, de ocorrência da cavitação em irregularidade na superfície da estrutura e conseqüente erosão nas proximidades. Adaptado de Falvey (1990).

O índice de cavitação ( $\sigma$ ) é o parâmetro usualmente utilizado na verificação da suscetibilidade à ocorrência do fenômeno e deriva da equação de Bernoulli, associada a condições de pressão de vapor. O índice  $\sigma$  é também definido, simplificadaamente, como a razão entre as pressões estática e dinâmica (KÖKPINAR e GÖGÜS, 2002). Dependendo das condições do escoamento e da superfície, caso o índice  $\sigma$  seja inferior a determinados limites críticos, a chance da ocorrência de cavitação é alta. O índice de cavitação crítico ( $\sigma_c$ ) está representado na Equação 3.18. Pelo fato de estar apresentado em função de limites críticos, algumas variáveis do índice foram nomeadas como “de referência”.

$$\sigma_c = \frac{P_{ref} - P_v}{\rho_w \frac{V_{ref}^2}{2}} \quad \text{Equação 3.18}$$

onde

$\sigma_c$  é o índice de cavitação crítico;

$P_{ref}$  é a pressão de referência [Pa];

$P_v$  é a pressão de vaporização da água [Pa];

$\rho_w$  é a massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>];

$V_{ref}$  é a velocidade média de referência [m/s].

### 3.2.2 Índice de cavitação em vertedouros

Devido às irregularidades inerentes associadas a superfícies de concreto, como as superfícies de vertedouros, por exemplo, tais estruturas são suscetíveis à ocorrência de danos por cavitação (KELLS e SMITH, 1991), especialmente quando em contato com escoamentos cujas velocidades são consideradas elevadas<sup>22</sup>. Nesses casos, as irregularidades favorecerão a ocorrência de pressões negativas na região, conforme indicado na Figura 3.2. Por esse motivo, pesquisadores têm sugerido índices de cavitação críticos à ocorrência do fenômeno da cavitação em vertedouros, como é o caso das propostas indicadas na sequência.

Para o caso de um escoamento em uma superfície lisa seguida de um degrau, conforme representado na Figura 3.3, Falvey (1990) indicou que a chance de ocorrência de cavitação é remota caso o índice de cavitação seja superior a 1,80 (isto é,  $\sigma_c$  para essa situação é igual a 1,80). Por outro lado, baseando-se em casos históricos de danos ocorridos em vertedouros de calha lisa, o autor indicou o uso de  $\sigma_c = 0,20$  nessas estruturas.

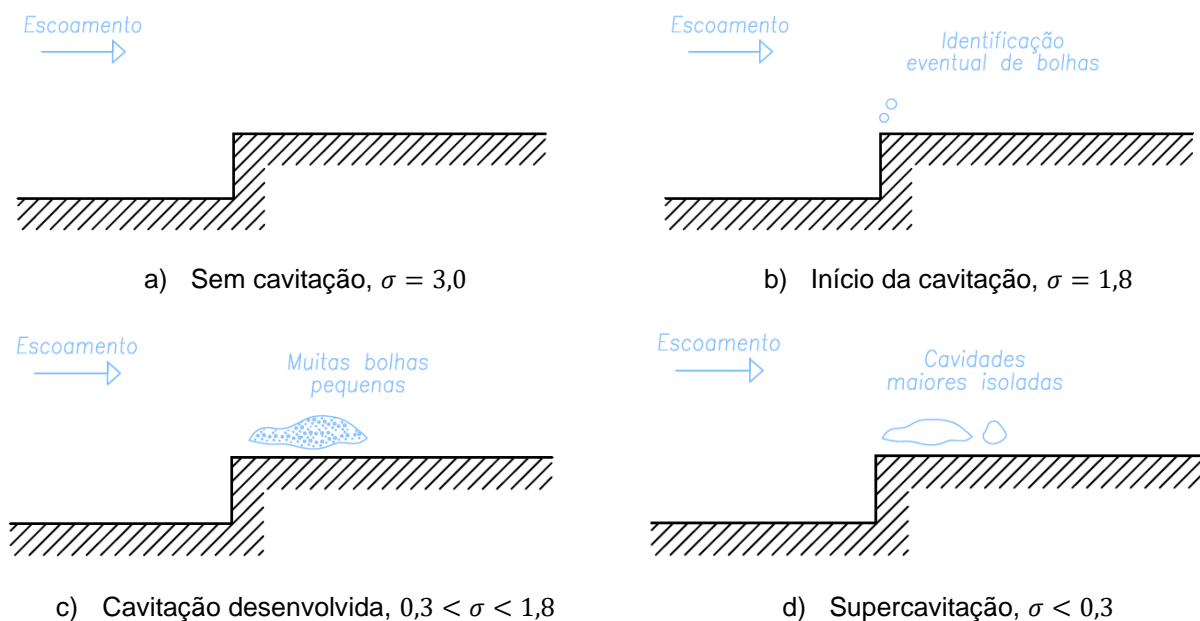


Figura 3.3 – Desenvolvimento da cavitação em superfície lisa com degrau. Esquemas em vista lateral, adaptado de Falvey (1990).

Devido às irregularidades formadas pelos degraus salientes ao escoamento, vertedouros com calha em degraus são mais suscetíveis à ocorrência de cavitação do que vertedouros com calha lisa (TERRIER, 2016). Por isso,  $\sigma_c$  para vertedouros em degraus deve ser mais conservador do que para canais lisos. Pfister et al. (2006a), por exemplo, sugerem  $\sigma_c = 0,90$  nas proximidades do

<sup>22</sup> A quantificação de “velocidades elevadas” é apresentada no item 3.2.3.

primeiro degrau da calha, amparados nas contribuições de Falvey (1990) e na consideração de que o degrau atua como uma irregularidade abrupta na superfície da estrutura.

Amador (2005), com base na avaliação do percentil estatístico 0,1% das pressões e na velocidade limite de 15 m/s no ponto de início de aeração, obteve  $\sigma_c$  da ordem de 0,83. O autor avaliou calhas em degraus com  $\alpha \approx 51^\circ$  e  $h_d = 0,6\text{ m}, 0,9\text{ m}$  e  $1,2\text{ m}$ . Este valor é mais conservador do que o indicado por Gomes (2006), que sugeriu  $\sigma_c \approx 0,60$ , para  $\alpha \approx 53^\circ$  e  $h_d = 0,3\text{ a }1,2\text{ m}$ .

Frizell et al. (2013), baseados em medições acústicas, definiram  $\sigma_c$  da ordem de 0,35 e 0,63, respectivamente, para calhas em degraus com declividades  $\alpha$  de 22 e 68 graus. Neste caso, o índice sugerido pelos autores está associado ao momento em que houve crescimento repentino nas taxas de ruído identificadas, e não ao momento em que as primeiras detecções acústicas ocorreram. Desse modo, entende-se que os resultados dos autores indicariam índices críticos com valor ainda maior (mais crítico), caso fossem consideradas as primeiras detecções acústicas como parâmetro (isto é, o início da ocorrência do fenômeno da cavitação).

Em seguida, Pfister e Boes (2014) sugeriram  $\sigma_c \approx 0,50$  a  $0,70$ , para canais com degraus de 0,30 m e 1,20 m de altura e  $\alpha = 50^\circ$ . Os autores obtiveram esses limites apoiados na consideração de Amador et al. (2009), que indicam vazões específicas máximas da ordem de 15 m<sup>2</sup>/s sobre vertedouros em degraus, de modo a se evitar a ocorrência da cavitação.

Mais recentemente, baseados em resultados de pressões mínimas associadas ao percentil 0,1%, Matos et al. (2022) indicaram  $\sigma_c \approx 0,70$  a  $0,80$  nas proximidades do ponto de início de aeração natural no escoamento. Este intervalo foi obtido considerando resultados associados a calhas em degraus com  $\alpha \approx 53^\circ$ , com degraus de 0,30 m até 1,20 m de altura.

Assim, em conformidade com os estudos relatados, pode-se sugerir um intervalo médio representativo da ordem de 0,60 a 0,80 para  $\sigma_c$  em vertedouros em degraus com  $\alpha \approx 50^\circ$  a  $53^\circ$ , na região de início de aeração do escoamento. A Tabela 3.4 apresenta um compilado dos trabalhos mencionados e respectivos índices  $\sigma_c$  recomendados.

Tabela 3.4 – Índice de cavitação crítico  $\sigma_c$  associado ao escoamento sobre vertedouros em degraus, com base em autores selecionados.

Autor (ano)	Especificidades	$\sigma_c$
Falvey (1990) e Pfister et al. (2006a)	Válido para a região nas proximidades do primeiro degrau da calha	0,90
Amador (2005)	$\alpha \approx 51^\circ$ ; $h_d = 0,6\text{ a }1,2\text{ m}$	0,83
Gomes (2006)	$\alpha \approx 53^\circ$ ; $h_d = 0,3\text{ a }1,2\text{ m}$	~ 0,60
Frizell et al. (2013)	$\alpha = 22^\circ$ e $\alpha = 68^\circ$	0,35 ~ 0,63
Pfister e Boes (2014)	$\alpha = 50^\circ$ ; $h_d = 0,3\text{ a }1,2\text{ m}$	0,50 ~ 0,70
Matos et al. (2022)	$\alpha \approx 53^\circ$ ; $h_d = 0,6\text{ a }1,2\text{ m}$	0,70 ~ 0,80

Os índices  $\sigma_c$  mencionados e apresentados na Tabela 3.4 estão associados a velocidades críticas do escoamento (para a ocorrência de cavitação e possíveis danos) e consequentes vazões específicas máximas. Da mesma forma como ocorre com o índice de cavitação, não há consenso claro entre as recomendações constantes na literatura quanto à vazão específica limite para projeto de vertedouros em degraus, de modo a evitar-se a ocorrência de danos por cavitação. O item seguinte aborda esses aspectos.

### 3.2.3 Cavitação em vertedouros em degraus

Entre os pesquisadores, há divergências no que diz respeito à ocorrência de danos oriundos da cavitação em vertedouros em degraus. Min et al. (1998)<sup>23</sup> apud Wang et al. (2012) mencionaram que o vertedouro da barragem Danjiangkou (China) apresentou danos de erosão devido à cavitação após a passagem de vazões específicas da ordem de 100 m<sup>2</sup>/s sobre a estrutura. Frizell et al. (2013) e Chanson (2015), por outro lado, afirmaram que não há evidência de dano por cavitação em vertedouros em degraus (pelo menos até o momento de divulgação dos respectivos trabalhos).

Chanson (2015) também afirmou que, entre os anos de 2010 e 2013, diversos vertedouros em degraus operaram durante uma sucessão de eventos de cheias, e que nenhum dano foi relatado, mesmo em estruturas submetidas a cheias durante semanas. Como exemplo tem-se o vertedouro da barragem Paradise (Austrália), submetido a vazões de até 19 m<sup>2</sup>/s, além de outros casos mencionados pelo autor, chegando a vazões da ordem de 70 ou 90 m<sup>2</sup>/s, sem registros de danos na estrutura. Entretanto, Frizell et al. (2015) atentaram ao fato de que alguns dos exemplos de vertedouros indicados por Chanson (2015) dizem respeito a estruturas que contêm particularidades, como a existência de pilares, por exemplo, que podem auxiliar na aeração do escoamento. Por esse motivo, as vazões específicas indicadas por Chanson (2015) não devem ser generalizadas para vertedouros em degraus com configurações convencionais (FRIZELL et al., 2015).

Sabe-se que as características turbulentas do escoamento sobre vertedouros em degraus causam pressões hidrodinâmicas significativas na superfície da estrutura, o que indica que a velocidade máxima usualmente admitida na avaliação do risco de cavitação em vertedouros lisos é insatisfatória para o caso de canais em degraus (AMADOR et al., 2005). Por não haver consenso na literatura, as práticas de projeto envolvendo vertedouros em degraus têm sido conservadoras, o que indica que a própria aeração natural do escoamento foi capaz, até o momento, de proteger a superfície da estrutura da possibilidade de danos causados pela cavitação (FRIZELL et al., 2013).

As incertezas a respeito da suscetibilidade à ocorrência de cavitação em vertedouros em degraus motivaram estudos com o objetivo de indicar limites de projeto envolvendo a vazão e a velocidade do escoamento nessas estruturas. Tozzi (1992), em seus estudos pioneiros, ao registrar alturas de

---

<sup>23</sup> Yang Min, Xi Xianhua, Ren Hongliang, et al. Hydraulic characteristic of flow on stepped dam. Discharging construction and high speed flow. Jilin Science and Technology Press, Chang Chun, pp:29-33, 1998 (em chinês).

pressão instantâneas negativas da ordem de - 0,50 m (em termos de altura de coluna piezométrica), já indicou a necessidade de se estabelecer um limite de vazão específica de modo a evitar a ocorrência de erosão por cavitação nos degraus. Segundo o autor, esse limite deveria ser menor do que o sugerido para calhas lisas, especialmente em virtude do trecho não aerado a montante do afloramento da camada limite à superfície livre.

Boes e Hager (2003b) indicaram vazões específicas limites da ordem de 25 m<sup>2</sup>/s para vertedouros em degraus. Este valor foi definido com base em estudo experimental de medição de concentração de ar no escoamento, em um modelo físico com  $30^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ , considerando valores de concentração de ar no fundo do escoamento inferiores a cerca de 5% a 8% como críticos à ocorrência de danos. O limite de vazão específica obtido pelos autores corresponde a velocidades da ordem de 20 m/s. Os autores ainda mencionaram que o limite de velocidade igual a 13 m/s, indicado previamente por outros estudos, é muito conservador. Dependendo da declividade da calha ou da altura do degrau, caso a ocorrência de cavitação seja provável, Boes e Hager (2003b) também alertaram que pode ser necessária a instalação de aeradores na região não aerada do escoamento, a jusante da crista do vertedouro.

Amador et al. (2005) comentaram que o limite de velocidade de 20 m/s, sugerido por Boes e Hager (2003b) para o projeto de vertedouros em degraus, é um valor muito alto. Em contrapartida, baseados em medições de pressões nos degraus, os autores recomendaram o uso de vazões específicas da ordem de 8,5 a 14 m<sup>2</sup>/s, o que corresponde a velocidades de 15 a 17 m/s. Já Pfister et al. (2006a), baseados em medições de pressão no primeiro degrau da calha, indicaram a vazão específica limite de 30 m<sup>2</sup>/s, de modo ao índice de cavitação do escoamento  $\sigma$  não resultar inferior a cerca de 0,90.

Com base na análise do coeficiente de pressão associado ao percentil 0,1% ( $C_{p0,1\%}$ ) na região de afloramento da camada limite, estimado por meio de medições de pressão na face vertical dos degraus, Amador et al. (2009) recomendaram o uso de vazões específicas entre 11 e 15 m<sup>2</sup>/s como limite aproximado para a não ocorrência de cavitação em vertedouros em degraus (equivalente a velocidades da ordem de 15 m/s no local de afloramento da camada limite, para vertedouros com  $\alpha \approx 50^\circ$ ). De modo semelhante, Gomes (2006) recomendou como limite o intervalo de 11,3 a 15,6 m<sup>2</sup>/s, o que corresponderia a velocidades médias da ordem de 17 m/s nas proximidades do ponto de início de aeração.

Novakoski et al. (2018) e Endres et al. (2019), com base em resultados experimentais de pressões negativas extremas (pressões com 0,1% de probabilidade de não serem excedidas), indicaram que a faixa de vazão específica que pode levar ao início da ocorrência da cavitação é da ordem de 9 a 17 m<sup>2</sup>/s. Na coleta de dados, os autores utilizaram modelos físicos reduzidos na escala geométrica de 1:10 com relação a um protótipo genérico. Para definição da vazão limite, os autores

consideraram que pressões relativas iguais ou inferiores a cerca de -10 m (em termos de altura de coluna piezométrica) podem suscitar o fenômeno da cavitação.

Por sua vez, Canellas (2020), através de estudo de caso considerando um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e  $\alpha \approx 53^\circ$ , definiu que o risco de cavitação existe quando a vazão específica supera cerca de 22 m<sup>2</sup>/s. O limite indicado está baseado em equações de previsão de pressões mínimas e de estimativa de concentração de ar no fundo da estrutura. Já Schumacher (2020), ao avaliar resultados associados a calhas em degraus com inclinação  $\alpha = 45^\circ$  e  $\alpha \approx 53^\circ$  e degraus com altura de 0,30 m, 0,60 m, 0,90 m e 1,20 m, identificou que vazões específicas da ordem de 10 m<sup>2</sup>/s já promovem o início da cavitação no escoamento.

Mais recentemente, Matos et al. (2022) indicaram vazões específicas limites da ordem de 15 a 20 m<sup>2</sup>/s, para calhas em degraus com  $\alpha \approx 53^\circ$  e alturas de degrau de 0,30 m até 1,20 m. Os autores obtiveram tais limites a partir da análise conjunta entre o índice de cavitação do escoamento, os índices de cavitação críticos (obtidos segundo diferentes abordagens) e a concentração de ar.

Os limites de vazão e velocidade anteriormente indicados estão compilados na Tabela 3.5. Todos os trabalhos mencionados dizem respeito a escoamentos submetidos à aeração natural (sem a presença de elementos aeradores na calha).

Tabela 3.5 – Limites de vazão específica e velocidade, em vertedouros em degraus submetidos à aeração natural, de modo a evitar-se a ocorrência do fenômeno da cavitação.

Autor (ano)	Vazão específica $q$ (m <sup>2</sup> /s)	Velocidade $V$ (m/s)
Boes e Hager (2003b)	25	20
Amador et al. (2005)	8,50 a 14	15 a 17
Pfister et al. (2006a)	30	-
Gomes (2006)	11,30 a 15,60	17
Amador et al. (2009)	11 a 15	15
Novakoski et al. (2018) e Endres et al. (2019)	9 a 17	-
Canellas (2020)	22	-
Schumacher (2020)	10	-
Matos et al. (2022)	15 a 20	-

Pelo exposto, entende-se que não há consenso no que diz respeito às vazões limite de dimensionamento de vertedouros em degraus, no sentido de evitar-se a ocorrência de cavitação. Essa afirmação vai ao encontro do pontuado por Matos e Meireles (2014, p. 8), quando indicaram que “[...] uma resposta definitiva não foi dada, até o momento, no que diz respeito à máxima vazão específica de dimensionamento de vertedouros em degraus, de modo a garantir uma operação segura.”<sup>24</sup> De qualquer forma, com base nos trabalhos informados e limites usualmente adotados,

<sup>24</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.



parece razoável indicar-se o intervalo de vazões específicas de dimensionamento da ordem de 15 a 20 m<sup>2</sup>/s, para vertedouros em degraus submetidos à aeração natural e com  $\alpha \approx 50^\circ$ , no sentido de evitar-se a ocorrência de cavitação no escoamento e consequentes danos na estrutura.

De acordo com Falvey (1990), considerando escoamentos em superfícies lisas, a maior pressão negativa acontece na fronteira entre o fluido e a estrutura e, nesses casos, o índice de cavitação pode ser estimado por meio de medições de pressão nesse local. Do contrário, caso a superfície não seja lisa, o escoamento irá se separar da estrutura e a pressão negativa mais significativa ocorrerá no interior do escoamento (isto é, entre o fundo e a superfície livre).

Desse modo, no caso de escoamentos em vertedouros em degraus, entende-se que o uso do índice de cavitação na previsão da suscetibilidade à cavitação, por meio de medições de pressão na fronteira entre o escoamento e a superfície, pode não ser o método ideal. Mesmo assim, até o momento, algumas das principais pesquisas que sugerem limites para a não ocorrência de cavitação em vertedouros em degraus utilizam medições de pressão na fronteira sólida da estrutura, como é o caso dos estudos desenvolvidos por Gomes (2006), Amador et al. (2009), Matos et al. (2022), dentre outros – já mencionados.

Quanto às medidas de proteção das superfícies de concreto contra os danos decorrentes da cavitação, Quintela e Ramos (1980) citaram:

- i. o acabamento rigoroso das superfícies de concreto em contato com o escoamento, de modo que não existam irregularidades capazes de provocar a cavitação;
- ii. a utilização de revestimentos específicos (blindagens de aço ou resinas) nos trechos mais vulneráveis da superfície em contato com o escoamento;
- iii. a aeração do escoamento.

Pode-se destacar que o acabamento rigoroso da superfície e a utilização de revestimentos específicos são alternativas onerosas e de difícil execução, além de não evitarem a ocorrência de danos por cavitação nas irregularidades que podem surgir no decorrer da vida útil da estrutura (QUINTELA E RAMOS, 1980). Desse modo, os mesmos autores apontaram a alternativa de aeração do escoamento como solução eficaz e de custo reduzido, se comparada às demais opções indicadas.

Deve-se destacar, contudo, que a aeração do escoamento não previne a ocorrência da cavitação, mas sim protege a estrutura contra os efeitos nocivos do fenômeno. O tópico seguinte (item 3.3) apresenta as principais contribuições no que diz respeito a informações relativas à eficiência da aeração na proteção contra os danos decorrentes da cavitação em estruturas hidráulicas.

### 3.3 AERAÇÃO COMO FORMA DE EVITAR DANOS DECORRENTES DA CAVITAÇÃO

Quintela e Ramos (1980, p. 47) apontaram que a aeração do escoamento, usada como alternativa à proteção dos danos oriundos da cavitação, “constitui uma das mais notáveis inovações [...] no domínio das construções hidráulicas”. Kells e Smith (1991) mencionaram que já se sabia que os efeitos destrutivos da cavitação poderiam ser reduzidos na presença de ar no escoamento, mas que somente a partir das décadas de 1980 e 1990 esse princípio passou a ser aplicado em projetos de vertedouros.

O entendimento de como a aeração no escoamento atua de modo a contribuir na redução da erosão se alterou com o passar do tempo. Peterka (1953) mencionou que, naquele momento, o que se sabia era que a inserção de ar contribui com o aumento da compressibilidade da mistura ar-água, de modo que as forças exercidas pelo colapso das cavidades de vapor são menores quando há certa quantidade de ar no escoamento (em consequência da absorção dos impactos pela mistura ar-água, mais compressível). Este entendimento é exposto também por Rasmussen (1956) e, mais tarde, por Semenov e Lentyaev (1973) e Volkart e Rutschmann (1984). Rasmussen (1956) também sugeriu que o ar inserido atuaria como uma espécie de amortecedor, reduzindo o “efeito martelo” provocado pelo colapso das cavidades na estrutura. Já Russel e Sheehan (1974) sugeriram, dentre outras suposições, que a presença de ar na água seria responsável por reduzir a velocidade do choque das ondas geradas na implosão das cavidades de vapor, o que reduziria, conseqüentemente, o impacto na superfície sólida.

Mais tarde, Falvey (1990) declarou que tanto a teoria que defende que a inserção de ar ameniza as subpressões, quanto a que argumenta que o ar atua como amortecedor entre o escoamento e a superfície, estão equivocadas. Por sua vez, o autor defendeu que a redução na possibilidade de ocorrência de dano por cavitação está relacionada com a mudança da velocidade do som nos escoamentos aerados, em conformidade com o que já havia sido brevemente pontuado por Russel e Sheehan (1974). A velocidade da onda de choque que ocorre imediatamente após a implosão da cavidade de vapor é igual à velocidade do som no escoamento (FALVEY, 1990). A presença de ar na água altera essa velocidade, conforme sugere a Figura 3.4, em uma relação inversamente proporcional. Desse modo, quanto mais ar inserido no escoamento, menor é a velocidade do som nesse meio. Conseqüentemente, menor é a velocidade das ondas de impacto e menor a quantidade de movimento envolvida no fenômeno, o que reflete em menores chances de ocorrência de dano nas estruturas.

Deve-se pontuar, por fim, que a velocidade do som no escoamento está relacionada com a compressibilidade do fluido. Conforme mencionam Bollaert e Schleiss (2003, p. 460), “[...] uma

pequena variação na quantidade de ar altera drasticamente a compressibilidade gás-líquido e, portanto, a velocidade da onda correspondente”<sup>25</sup>.

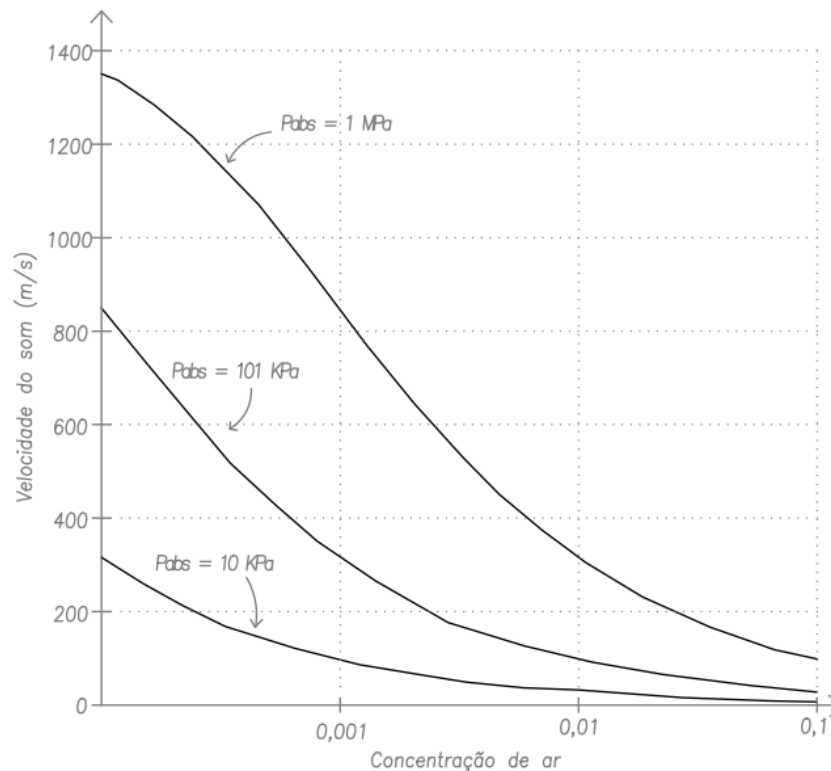


Figura 3.4 – Velocidade do som em um escoamento composto por ar e água a uma temperatura de 10°C. Adaptado de Falvey (1990).

Atualmente, entende-se que o indicado por Falvey (1990) é a teoria em uso. Por consequência, também é consenso de que a inserção de ar na água aumenta a compressibilidade da mistura, reduzindo a intensidade das forças decorrentes do colapso das cavidades de vapor. Conforme pontuado por Peterka (1953) e Volkart e Rutschmann (1984), a inserção de 0,1% de ar na água aumenta a compressibilidade da mistura em 10 vezes. Finalmente, pode-se destacar que é consenso que a presença de ar na água reduz ou até elimina os danos decorrentes da cavitação, independentemente do real motivo (KELLS e SMITH, 1991).

Quanto aos estudos que relacionam a concentração de ar no escoamento com a ocorrência de danos em estruturas de concreto, o desenvolvido por Peterka (1953) é pioneiro e, ainda, um dos mais mencionados. O experimento do autor consiste em uma tubulação com uma seção contraída (onde a velocidade do escoamento atinge cerca de 30 m/s), com corpos de prova de concreto instalados a jusante dessa seção. Os corpos de prova foram expostos por 2 h a escoamentos contendo diferentes percentuais de ar, com relação à quantidade de água. Peterka (1953) concluiu que cerca de 7% de ar (com relação ao volume de água) foi suficiente para que não houvesse perda de massa nos corpos de prova ensaiados. Os principais resultados do autor estão ilustrados na

<sup>25</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.

Figura 3.5, que apresenta o percentual de ar no escoamento relacionado tanto com a perda de peso dos corpos de prova quanto com o índice de cavitação ( $\sigma$ ).

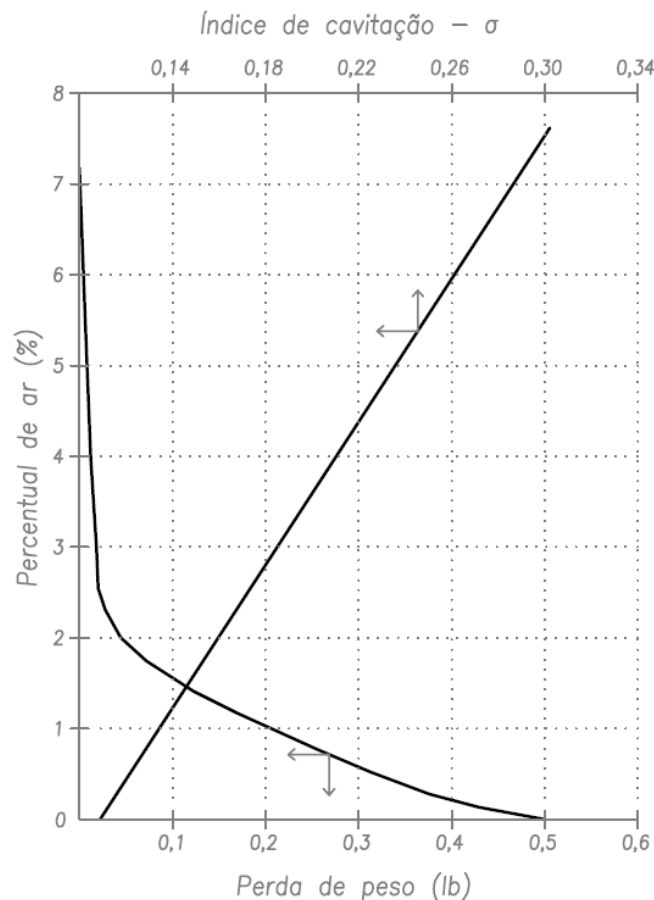


Figura 3.5 – Relação entre a perda de peso em corpos de prova de concreto e o índice de cavitação com o percentual de ar no escoamento. Adaptado de Peterka (1953).

De acordo com a Figura 3.5, percebe-se uma mudança brusca no comportamento da curva de perda de peso nos corpos de prova quando o percentual de ar excede 2%. Pela Figura 3.5 também é possível observar que o aumento no percentual de ar reflete no aumento do índice de cavitação  $\sigma$ , dado que ocorreu um acréscimo nas pressões (PETERKA, 1953). Tais pressões foram medidas com auxílio de um manômetro instalado ligeiramente a jusante da seção contraída, a montante do local de instalação dos corpos de prova. De acordo com Peterka (1953), tais resultados reforçam a validade do índice  $\sigma$  como um parâmetro auxiliar à avaliação do potencial de cavitação em escoamentos. Ademais, é importante ressaltar que, conforme indicado pelo mesmo autor, ainda que o índice de cavitação não contenha parâmetros diretamente associados à concentração de ar no escoamento, o efeito da aeração exerce influência na pressão do escoamento: “[...] a entrada de ar aumenta a pressão do escoamento e, conseqüentemente, o índice de cavitação”<sup>26</sup> (PETERKA, 1953, p. 10).

<sup>26</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.

Quanto às contribuições de Peterka (1953), vale ressaltar que a quantidade de ar mencionada pelo autor sempre diz respeito ao “percentual de ar, com relação ao volume de água” do sistema. Desse modo, sugere-se que o entendimento de que tais valores sejam a “concentração de ar da mistura” pode ser equivocado – de qualquer forma, será muito próximo disso.

Rasmussen (1956) desenvolveu estudos semelhantes aos de Peterka (1953), entretanto com aparato experimental distinto, analisando o efeito da inserção de ar em escoamentos em contato com estruturas compostas por materiais como alumínio, ferro e latão. O autor concluiu que 8 a 10 partes de ar, com relação a mil partes de água em volume, foram suficientes para eliminar a ocorrência de erosão por cavitação nos elementos estudados.

Russel e Sheehan (1974) realizaram estudos em escoamentos com diferentes percentuais de ar, com relação à vazão de água, de modo semelhante ao realizado por Peterka (1953). Os autores analisaram, ainda, corpos de prova de concreto de diferentes resistências estruturais e concluíram que cerca de 5% de ar foi suficiente para eliminar a ocorrência de erosão devido à cavitação em todos os concretos testados, mesmo para escoamentos de elevadas velocidades (no caso, 46 m/s).

Os estudos de Dong e Su (2006) e Dong et al. (2007, 2008, 2010) ofereceram importantes contribuições no que diz respeito à aeração de escoamentos e consequente redução da chance de erosão em estruturas de concreto. Os autores utilizaram como instalação experimental uma tubulação contendo uma seção contraída, apresentada na Figura 3.6, onde a velocidade pode atingir até 50 m/s e o escoamento ser submetido a diferentes quantidades de ar. No caso, as quantidades de ar indicadas pelos autores dizem respeito às concentrações de ar médias no escoamento (Equação 3.1),  $C_a$ . As principais conclusões dos referidos autores estão expostas na sequência.

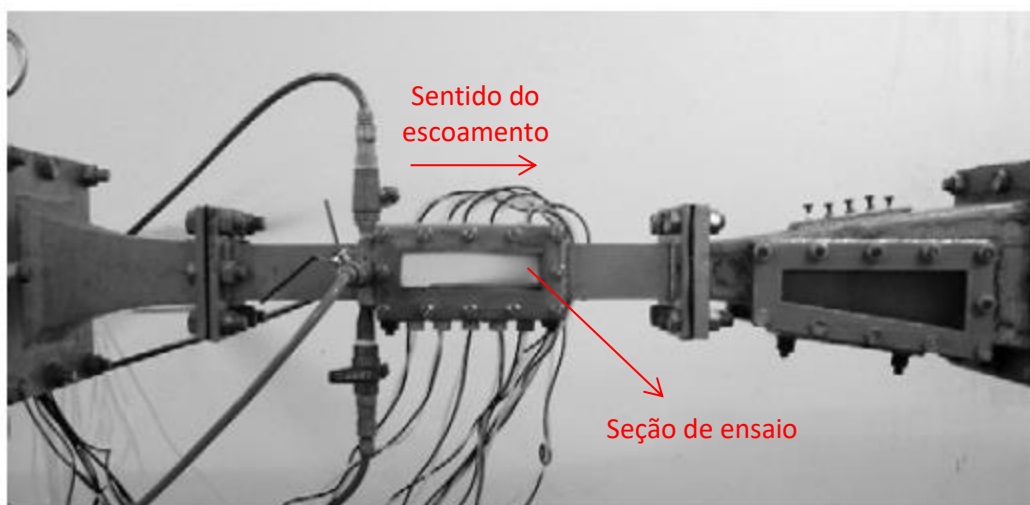


Figura 3.6 – Estrutura utilizada nos estudos de Dong e Su (2006) e Dong et al. (2007, 2008, 2010). Adaptado de Dong et al. (2008).

Dong e Su (2006) mediram as pressões (por meio de transdutores de pressão) em escoamentos expostos a diferentes concentrações de ar e velocidades. Os resultados dos autores estão

apresentados na Figura 3.7, onde é possível visualizar que as pressões para todas as situações em que foi inserido ar no escoamento são superiores à situação em que não há ar. Todos os resultados expostos na Figura 3.7 dizem respeito a medições de pressão em uma seção localizada 2 cm a jusante do ponto de inserção de ar. Na Figura 3.7, os resultados adquiridos na primeira metade do tempo (posicionados mais à esquerda em cada gráfico) dizem respeito ao escoamento aerado.

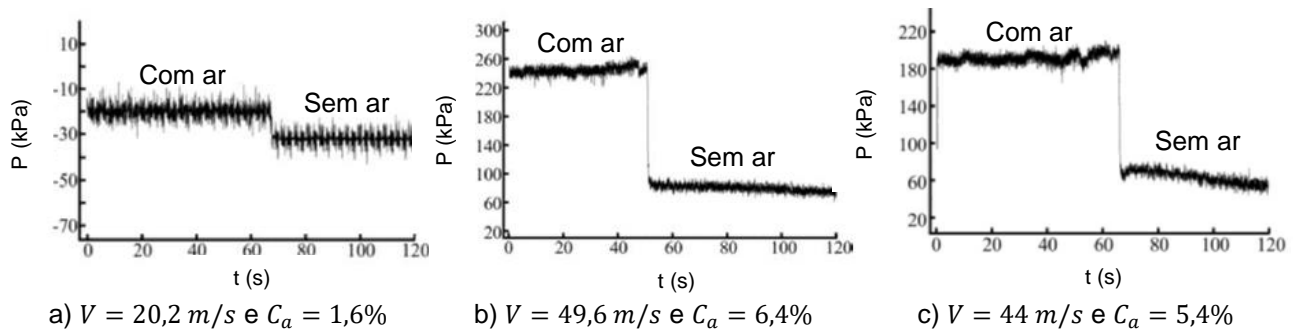


Figura 3.7 – Pressão ao longo do tempo, em ensaios com diferentes condições de velocidade do escoamento e concentração de ar. Adaptado de Dong e Su (2006).

Dong e Su (2006) também apresentaram uma relação entre a velocidade do escoamento e a concentração de ar mínima para que não ocorra erosão por cavitação no concreto ( $C_{a_{min}}$ ), representada na Figura 3.8. Foram testados corpos de prova de concreto com resistência à compressão de 6,2 MPa a 15,7 MPa, durante 2 h. Os autores não mencionam qual foi o critério utilizado para indicar a não ocorrência de erosão por cavitação, tampouco indicam se houve variação entre os resultados considerando os corpos de prova de diferentes características estruturais. Com base no ajuste proposto pelos autores (Figura 3.8), cerca de 3% de ar é suficiente para que não ocorram danos por cavitação em estruturas de concreto expostas a escoamentos com velocidade da ordem de 30 m/s.

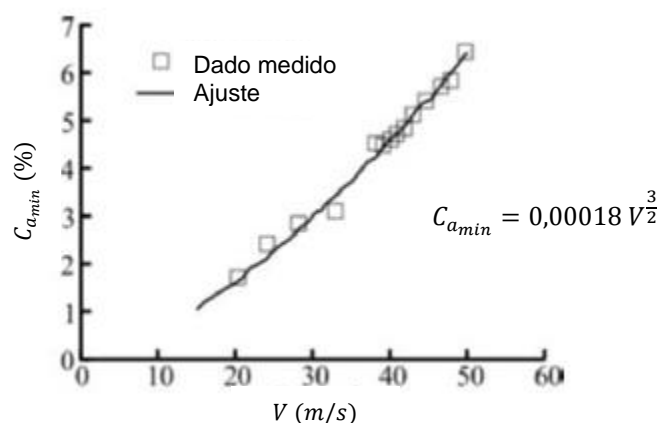


Figura 3.8 – Relação entre a velocidade média do escoamento e a concentração de ar mínima para que não ocorra erosão por cavitação no concreto. Adaptado de Dong e Su (2006).

Dong et al. (2007) estudaram a erosão em um corpo de prova de concreto, de 0,14 m de comprimento e seção transversal de 0,04 m x 0,06 m, com resistência à compressão igual a 15,7 MPa. O corpo de prova foi exposto a um escoamento sem aeração, cuja velocidade era de 50 m/s, e em 5 minutos a perda de material foi de 65% (de 612 g para 216 g). A Figura 3.9 apresenta

o material restante do corpo de prova ensaiado. Na sequência, os autores ensaiaram um segundo corpo de prova, com as mesmas características que o primeiro, contudo, este foi exposto a um escoamento cuja concentração de ar média era igual a 4,8%, durante 15 minutos, submetido à mesma velocidade (50 m/s). O resultado deste segundo ensaio está apresentado na Figura 3.10, onde ainda é possível perceber a ocorrência de erosão (os pontos mais escuros na Figura 3.10), embora drasticamente menor do que no caso anterior.

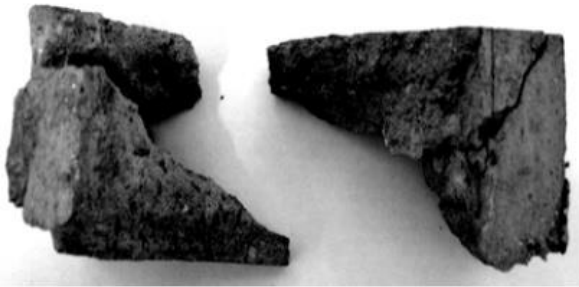


Figura 3.9 – Concreto após ensaio de 5 min,  $C_a = 0\%$  e  $V = 50 \text{ m/s}$  (Dong et al., 2007).

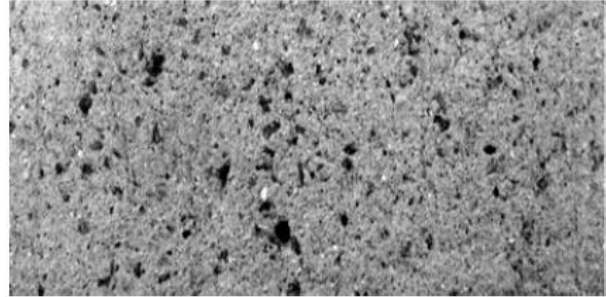


Figura 3.10 – Concreto após ensaio de 15 min,  $C_a = 4,8\%$  e  $V = 50 \text{ m/s}$  (Dong et al., 2007).

Os estudos mencionados nesse item reiteram o entendimento de que a inserção de ar é capaz de reduzir a chance de ocorrência de dano por cavitação em estruturas de concreto. Em casos práticos, como é o caso de vertedouros, por exemplo, onde a velocidade do escoamento é suficientemente alta a ponto de viabilizar a ocorrência de erosão por cavitação, a estrutura de concreto em contato com o escoamento deve ser tão lisa quanto possível, ou devem ser previstos dispositivos que propiciem a entrada de ar no escoamento (RUSSEL E SHEEHAN, 1974). Tais dispositivos, conhecidos como aeradores, são constituídos por uma rampa ou degrau, na maioria dos casos, instalados em conjunto com um mecanismo que permita a entrada de ar na porção inferior do escoamento (entre a estrutura de concreto e o escoamento).

Quando a introdução de ar é feita artificialmente, isto é, através de aeradores, diz-se que o escoamento está sujeito à aeração induzida, ou aeração forçada (KELLS e SMITH, 1991). Na sequência serão mencionados os principais estudos envolvendo aeradores em vertedouros, tanto aqueles construídos em canais lisos quanto, mais recentemente, em calhas em degraus.

### 3.4 AERADORES EM VERTEDOUROS

Os estudos mencionados em 3.3 dizem respeito à concentração de ar no escoamento e à consequente redução dos danos decorrentes da cavitação. Tais contribuições foram estabelecidas sabendo-se os percentuais de concentração de ar média no escoamento e, desse modo, nada se pode afirmar quanto à concentração de ar no fundo necessária à proteção da estrutura.

De acordo com Pfister e Hager (2010b) e Terrier (2016), no contexto da prevenção da ocorrência da cavitação, o conhecimento da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  é primordial. Entretanto, devido à natureza dos trabalhos existentes até o momento, o valor mínimo de  $C_b$  necessário para se evitarem danos em consequência desse fenômeno ainda não está bem definido

(TERRIER, 2016). Assim, provavelmente por esse motivo e, favoravelmente à segurança, utilizam-se os valores de  $C_a$  (indicados pelos trabalhos apresentados no item 3.3) como sendo o valor mínimo necessário de  $C_b$ .

Essa observação vai ao encontro do sugerido por Chanson (1989) quando indicou que, em escoamentos sobre vertedouros, a superfície da estrutura estará protegida dos possíveis danos causados pela cavitação se a entrada natural de ar, proveniente da atmosfera, for capaz de prover valores de concentração de ar superiores a cerca de 7% no fundo do escoamento. Entende-se que Chanson (1989) tenha utilizado as conclusões de Peterka (1953) nessa afirmação.

Kells e Smith (1991) destacaram que, geralmente, para o caso de vertedouros onde a aeração do escoamento acontece apenas de modo natural, o ar não será capaz de reduzir os danos decorrentes da cavitação na estrutura. Nessas situações, ou nos casos em que a velocidade do escoamento é elevada<sup>27</sup>, recomenda-se a instalação de aeradores. Terrier (2016) afirmou que, após o emprego de aeradores nas regiões de escoamento não aerado sobre vertedouros, danos decorrentes da cavitação nessas estruturas não foram mais observados.

Para evitar o surgimento de erosão em vertedouros, ainda não há consenso nas velocidades máximas a serem empregadas na etapa de projeto. As recomendações de autores incluem intervalos desde 12 a 15 m/s (SEMENKOV e LENTYAEV, 1973) até 20 a 30 m/s (CHANSON, 1989; PFISTER e HAGER, 2010a). Tais valores concordam com o intervalo de 15 a 20 m/s, recomendado por diferentes autores como limite de velocidade do escoamento sobre vertedouros em degraus – conforme apresentado na Tabela 3.5 (item 3.2.3).

Não apenas a ocorrência de velocidades elevadas, mas também o interesse pelo incremento de vazões específicas em vertedouros implica na alternativa de utilizarem-se aeradores. Enquanto velocidades altas favorecem a ocorrência de pressões negativas localizadas, vazões específicas elevadas dificultam a aproximação do ar da atmosfera até a superfície da estrutura de concreto do vertedouro (VOLKART E RUTSCHMANN, 1984).

Os dispositivos aeradores mais comuns utilizados em canais de vertedouros são os defletores, os degraus e as ranhuras. Analisando o comportamento dos principais modelos de dispositivos aeradores, além de combinações entre eles, Volkart (1983) concluiu que os melhores resultados, no que diz respeito à entrada de ar no escoamento, foram atingidos com a combinação de um degrau a um defletor, conforme sugere a Figura 3.11.

Dispositivos aeradores devem ser combinados a uma estrutura que permita a entrada de ar desde a atmosfera até o escoamento, conhecida como dispositivo adutor de ar. O conjunto formado pela

---

<sup>27</sup> A quantificação de “velocidade elevada” é apresentada na sequência.



união entre os dispositivos aerador e adutor é chamado de sistema aerador (EEUFMG, 1989), como indicado na Figura 3.11, ou, simplesmente, aerador.

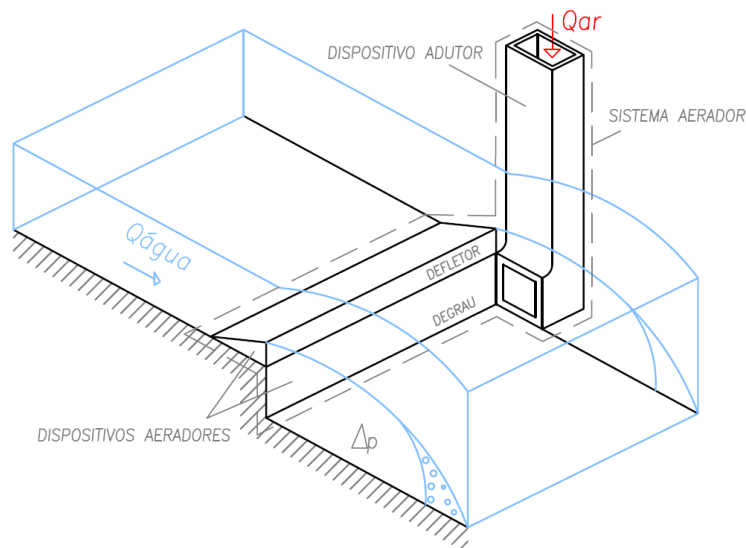


Figura 3.11 – Representação esquemática do dispositivo aerador em conjunto com o dispositivo adutor (formando o sistema aerador).

Volkart e Rutschmann (1984) mencionaram que o objetivo dos sistemas aeradores é induzir uma queda localizada de pressão, de modo que o ar seja succionado para o interior do escoamento de água. Os dispositivos aeradores produzem um “vazio” na parcela inferior de um jato em altas velocidades, o que ocasiona uma região onde a pressão é negativa – isto é, ocorre subpressão nessa região (KELLS E SMITH, 1991). A subpressão acontece na cavidade existente entre o escoamento e a estrutura, imediatamente a jusante do dispositivo aerador, e será aqui identificada por  $\Delta p$ , conforme indicado na Figura 3.11. A subpressão  $\Delta p$  interfere no desempenho do sistema aerador, uma vez que controla o equilíbrio entre a demanda de ar do escoamento e a oferta de ar do dispositivo adutor (PFISTER, 2011).

Quanto ao entendimento de como ocorre a inserção de ar no escoamento, Pinto et al. (1982) indicaram que a mudança repentina no alinhamento da superfície da estrutura cria uma interface ar-água, onde a elevada velocidade do escoamento arrasta o ar para seu interior. Uma vez que os efeitos da tensão superficial são superados, a interface ar-água adquire um aspecto de esguicho (“spray”), e é justamente este efeito que é preponderante no que diz respeito à inserção de ar nos sistemas aeradores das estruturas (PINTO et al., 1982).

A Figura 3.12 apresenta as zonas do escoamento nas proximidades e a jusante de um sistema aerador composto por degrau e defletor, em um vertedouro constituído por canal liso, além de apresentar os perfis de concentração de ar no fundo do escoamento ( $C_b$ ) e de pressão na superfície da estrutura ( $P$ ). As zonas do escoamento foram delimitadas e definidas por Pinto et al. (1982),

Volkart e Rutschmann (1984) e Chanson (1989), de onde foram retiradas as informações subsequentes, referentes às características principais de cada zona<sup>28</sup>.

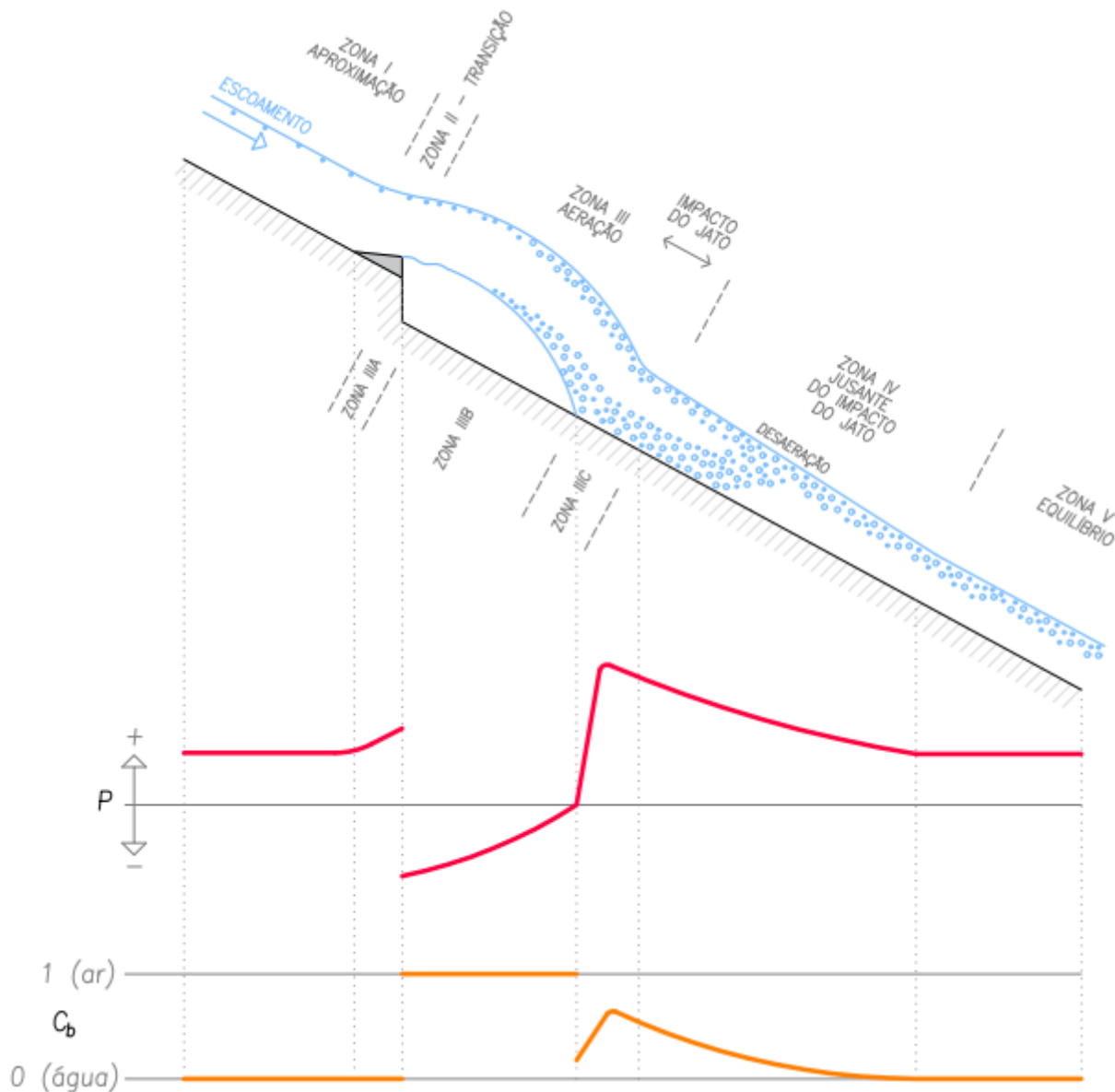


Figura 3.12 – Regiões do escoamento em um dispositivo aerador e perfis de concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  e de pressão  $P$  na superfície da estrutura. Esquema em vista lateral.

Adaptado de Volkart e Rutschmann (1984) e Chanson (1989).

- i. Zona I (de aproximação): localizada imediatamente a montante do dispositivo aerador, nessa zona apenas a região do escoamento em contato com a atmosfera é aerada (CHANSON, 1989);

<sup>28</sup> Com relação à classificação das zonas do escoamento em vertedouros com aeradores, as referências citadas são as principais e precursoras. Há outras classificações semelhantes em trabalhos mais recentes, como Pfister e Hager (2010a, b) e em Bai et al. (2016), que se constituem, na verdade, por pequenas variações das já definidas por Pinto et al. (1982), Volkart e Rutschmann (1984) e Chanson (1989).

- ii. Zona II (transição): região que coincide com o comprimento do dispositivo aerador. Nessa zona, o contato com o defletor altera o comportamento do perfil de pressões no escoamento, aumentando os esforços na superfície da estrutura (CHANSON, 1989);
- iii. Zona III (aeração): região em que ocorre a entrada de ar tanto na superfície do escoamento, em contato com a atmosfera, quanto na parcela inferior do jato formado após o escoamento perder contato com o dispositivo aerador. Há uma queda brusca de pressão quando o escoamento perde contato com o defletor. Nessa região, as pressões são próximas ou inferiores à pressão atmosférica (quer seja devido à velocidade do escoamento, quer seja devido às perdas no dispositivo adutor). Na extensão dessa região estão inseridas as zonas em que a tensão superficial é superada e onde o escoamento adquire aspecto de esguicho (respectivamente, zonas IIIA e IIIB). A zona de mistura (IIIC), por sua vez, é a região afetada pelo impacto do jato e responsável por inserir uma quantidade adicional de ar no escoamento (CHANSON, 1989). No impacto do jato, a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  e a pressão na estrutura  $P$  são máximas e a dissipação da energia do escoamento é alta (PINTO et al., 1982; VOLKART E RUTSCHMANN, 1984; CHANSON, 1989). A região é caracterizada por uma rápida redistribuição no perfil de concentração de ar uma vez que, devido às elevadas pressões, o escoamento sofre perda de ar significativa e localizada (CHANSON, 1989). Ocorrem ligeiras variações na posição de impacto do jato, o que Chanson (1989) sugere que seja decorrente de oscilações na subpressão da cavidade sob o escoamento ( $\Delta p$ );
- iv. Zona IV (jusante do impacto): região em que a concentração de ar no fundo reduz gradativamente, dado que as bolhas de ar tendem a alcançar a superfície, até que seja necessária a instalação de outro sistema aerador;
- v. Zona V (equilíbrio no escoamento): região caracterizada pelo equilíbrio nos perfis de concentração de ar, velocidade e pressão, apresentando escoamento com comportamento quase uniforme ao longo da calha.

Mais detalhes sobre cada uma das zonas, tanto no que diz respeito à evolução dos perfis de concentração de ar no escoamento quanto às pressões na estrutura, encontram-se, respectivamente, nos itens 3.4.3 e 3.4.4, e serão discutidos mais adiante.

Dado que o sistema aerador é composto pelos dispositivos adutor e aerador, seu funcionamento depende da interação entre ambos. Volkart e Rutschmann (1984) mencionaram que a continuidade do processo de aeração no escoamento requer o suprimento contínuo de ar pelo dispositivo adutor. A interação entre os dispositivos que compõem o sistema aerador está ilustrada na Figura 3.13, cujas curvas representadas são conhecidas como curvas características do sistema aerador. O ponto de funcionamento do sistema aerador ocorre na interseção entre as curvas.

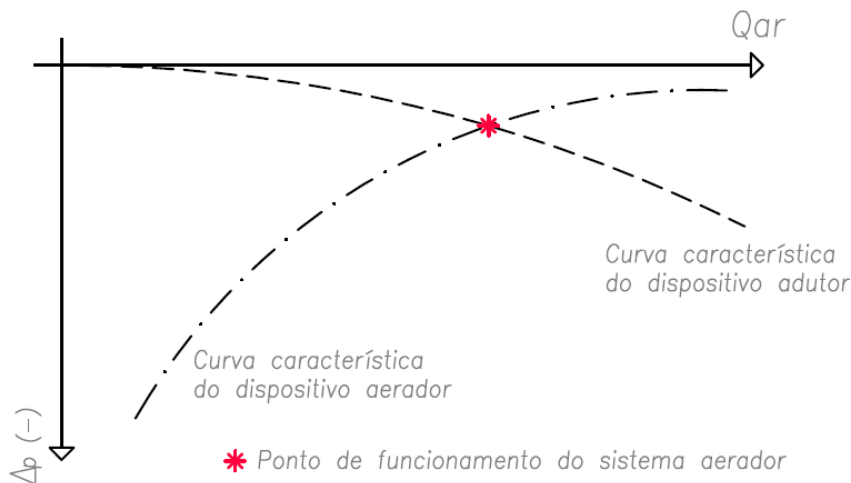


Figura 3.13 – Curvas características e ponto de funcionamento do sistema aerador.  
Adaptado de Volkart (1983).

Os itens subsequentes (3.4.1 e 3.4.2) dizem respeito a parâmetros relacionados a vertedouros que possuem aeradores instalados na calha. São indicadas contribuições de pesquisadores que utilizaram tanto vertedouros de calha lisa quanto, mais recentemente, em degraus. Os itens 3.4.3 e 3.4.4 tratam, respectivamente, da concentração de ar no escoamento e das pressões sobre os degraus, a exemplo do já realizado para o caso de vertedouros com aeração natural (apresentado no item 3.1).

A Figura 3.14 identifica os parâmetros utilizados nas equações dos itens seguintes, para vertedouros constituídos por calha lisa e em degraus, com sistema aerador. Reitera-se que, quando há sistema aerador instalado na estrutura, diz-se que o escoamento está submetido à aeração induzida ou forçada.

Em situações de aeração induzida, considera-se que o número de Froude do escoamento ( $Fr_0$ ) é aquele correspondente à seção imediatamente a montante do dispositivo aerador (à entrada do aerador, como indicado na Figura 3.14), e é calculado de acordo com a Equação 3.19 (no caso de seções transversais retangulares).

$$Fr_0 = \frac{V_0}{\sqrt{g h_0}} \quad \text{Equação 3.19}$$

onde

$V_0$  é a velocidade média do escoamento imediatamente a montante do defletor [m/s].

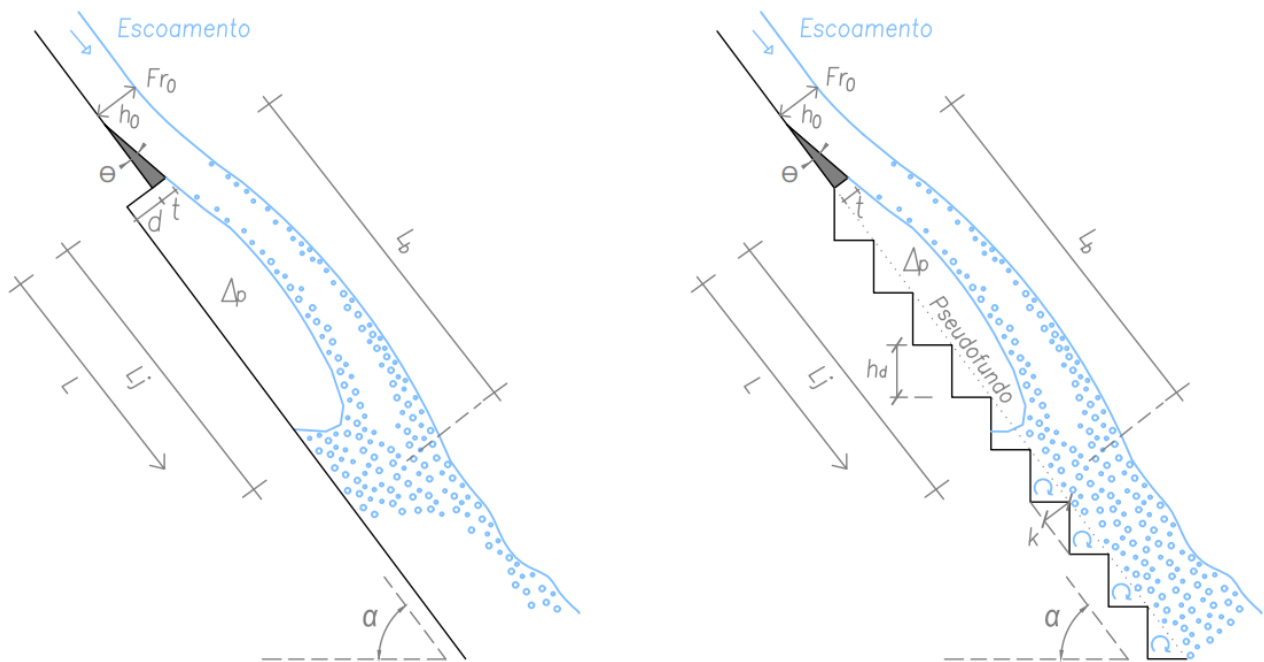


Figura 3.14 – Representação esquemática, em vista lateral, dos parâmetros para vertedouros com calha lisa e em degraus submetidos à aeração induzida.

onde

$Fr_0$  é o número de Froude do escoamento na entrada do dispositivo aerador, Equação 3.19;

$h_0$  é a profundidade do escoamento imediatamente a montante do defletor [m];

$\theta$  é o ângulo do defletor [graus];

$t$  é a altura do defletor [m];

$d$  é a altura do degrau imediatamente a jusante do defletor, em calha lisa [m];

$L$  é a distância longitudinal à calha, a contar da extremidade do dispositivo aerador [m];

$L_j$  é o comprimento do jato [m];

$L_b$  é o comprimento da *blackwater* [m].

### 3.4.1 Coeficiente de entrada de ar $\beta$

A entrada de ar em um sistema aerador é quantificada com base no coeficiente  $\beta$ , conforme sugerido por Pinto et al. (1982). Tal coeficiente foi proposto segundo análise dimensional dos parâmetros envolvidos na entrada de ar em sistemas aeradores, somada a simplificações, e está apresentado na Equação 3.20.

$$\beta = \frac{Q_{ar}}{Q_{\acute{a}gua}} \quad \text{Equação 3.20}$$

onde

$\beta$  é o coeficiente de entrada de ar;

$Q_{ar}$  é a vazão de ar inserida pelo sistema aerador [m<sup>3</sup>/s];

$Q_{\acute{a}gua}$  é a vazão de água sobre o vertedouro [m<sup>3</sup>/s].

Como pode ser inferido pela Equação 3.20, o coeficiente  $\beta$  representa apenas o montante de ar inserido pelo sistema aerador, sem considerar a relação entre o ar e o escoamento a jusante do sistema. Além disso, o coeficiente  $\beta$  não leva em conta o ar inserido no escoamento pela superfície. Por tais motivos, pode não ser considerado um parâmetro importante para alguns pesquisadores,

conforme indicado por Pfister e Hager (2010a). Contudo, entende-se que o conhecimento de  $\beta$  orienta a etapa de projeto do sistema aerador.

Embora exista divergência com relação à importância da análise do coeficiente  $\beta$ , este é um parâmetro extensivamente investigado por diversos pesquisadores. Alguns dos resultados dos principais estudos envolvendo a determinação deste coeficiente estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Equações que determinam o coeficiente  $\beta$ .

Autor	Equação	
Pinto et al. (1982)	$\beta = 0,033 \frac{L_j}{h_0}$	Equação 3.21 <sup>29</sup>
Rutschmann et al. (1986)	$\beta = 0,1713 (Fr_0 - 4,94) - \frac{\Delta p}{h_0}$	Equação 3.22 <sup>30</sup>
Kökpinar e Gögüs (2002)	$\beta = 0,0189 \left(\frac{L_j}{h_0}\right)^{0,83} \left[\left(\frac{A_a}{A_w}\right) (1 + \tan \alpha)\right]^{0,24}$	Equação 3.23 <sup>31</sup>
Pfister et al. (2006b)	$\beta = 0,0077 (Fr_0 - 3,2)$	Equação 3.24 <sup>32</sup>
Zamora et al. (2008)	$\beta = 0,0016 (Fr_0 - 2,7)^3 + 0,001$	Equação 3.25 <sup>33</sup>
Pfister e Hager (2010b)	$\beta = 0,0028 Fr_0^2 (1 + Fr_0 \tan \theta) - 0,1$	Equação 3.26 <sup>34</sup>
Terrier (2016)	$\beta = 0,0077 \frac{L_j}{h_0}$	Equação 3.27 <sup>35</sup>
Terrier (2016)	$\beta = 0,013 Fr_0 (1 + \sin \alpha)^{1,5} (1 + \tan \theta)^3 - 0,096$	Equação 3.28 <sup>36</sup>

onde

$A_a$  é a área do dispositivo adutor de ar [m<sup>2</sup>];

$A_w$  é a área do escoamento de água a montante do dispositivo aerador [m<sup>2</sup>].

As equações constantes na Tabela 3.6 (Equação 3.21 à Equação 3.28) apresentam relações com o coeficiente  $\beta$  que consideram desde apenas a razão entre  $L_j$  e  $h_0$ , conforme sugerido inicialmente por Pinto et al. (1982), até a influência do número de Froude do escoamento  $Fr_0$  e da subpressão  $\Delta p$ . De acordo com as equações apresentadas, pode-se destacar que  $\beta$  é fortemente influenciado por  $Fr_0$ . Embora algumas equações sejam definidas em função de  $L_j$ , este parâmetro também é influenciado por  $Fr_0$  (conforme indicado na sequência, no item 3.4.2).

As retas dadas pela Equação 3.21 e pela Equação 3.27, embora semelhantes no que diz respeito ao parâmetro associado à  $\beta$  (ambas levam em conta  $L_j/h_0$ , apenas), diferem consideravelmente no coeficiente de inclinação, o que deve ter relação com a inclinação da calha avaliada pelos autores: enquanto Pinto et al. (1982) estudaram uma estrutura com  $\alpha \approx 16^\circ$ , Terrier (2016) avaliou

<sup>29</sup> Com base em resultados de protótipo e modelo do vertedouro Foz do Areia,  $\alpha \approx 16^\circ$ .

<sup>30</sup> Com base nos resultados de Pinto et al. (1982). Válida para  $Fr_0 \geq 5$ .

<sup>31</sup> Calha lisa,  $0 \leq \tan \alpha \leq 1,25$ ,  $5,56 \leq Fr_0 \leq 10$ ,  $0,02 < A_a/A_w < 1$ .

<sup>32</sup> Calha em degraus,  $\alpha = 50^\circ$ ,  $h_d = 0,093$  m,  $3,2 < Fr_0 < 6,0$ .

<sup>33</sup> Calha em degraus,  $\alpha = 50^\circ$ ,  $h_d = 0,093$  m,  $2,7 < Fr_0 < 5,5$ .

<sup>34</sup> Calha lisa,  $5,8 \leq Fr_0 \leq 16,1$ ,  $0^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ ,  $0^\circ \leq \theta \leq 11,3^\circ$ ,  $0,06 \leq (t + d)/h_0 \leq 2,10$ .

<sup>35</sup> Calha em degraus,  $\alpha = 30^\circ$  e  $50^\circ$ ,  $h_d = 0,03$  e  $0,06$  m,  $0,052$  m  $\leq h_0 \leq 0,092$  m,  $0,015$  m  $\leq t \leq 0,045$  m,  $3,2 < Fr_0 < 7,5$ .

<sup>36</sup> Mesmas observações que as da Equação 3.27.

declividades  $\alpha = 30^\circ$  e  $50^\circ$ . Esse fato evidencia a necessidade de seleção cautelosa da equação de previsão de  $\beta$ , a depender, dentre outros, da declividade de calha analisada.

Conforme Terrier (2016), os principais parâmetros associados ao coeficiente  $\beta$  são dados por

$$\beta = f\left(Fr_0, \frac{h_d}{h_0}, \frac{t}{h_0}, \alpha, \theta\right).$$

Avaliando diferentes combinações destes parâmetros, o referido autor sugeriu a Equação 3.28 (apresentada na Tabela 3.6) para estimativa de  $\beta$ , função de  $Fr_0$ ,  $\alpha$  e  $\theta$ . Terrier (2016) menciona que a relação  $t/h_0$  pouco contribuiu na melhora da equação de previsão, e a relação  $h_d/h_0$  apresentou influência ainda menor.

Conforme sugerido por Volkart (1983), a correta estimativa da demanda de ar em um sistema aerador está condicionada ao conhecimento da subpressão  $\Delta p$ . As equações apresentadas na Tabela 3.6 que não consideram  $\Delta p$  foram determinadas em ensaios cujo parâmetro pudesse ser desconsiderado, de acordo com os critérios de cada autor (ainda que não mencionados em alguns casos).

Pfister (2011) indicou que, para garantir o bom desempenho do sistema aerador, a relação apresentada na Equação 3.29 deve ser satisfeita, isto é, subpressões cujos valores são inferiores a 10% da profundidade  $h_0$  representam poucos efeitos no escoamento. Nesses casos, o efeito de  $\Delta p$  pode ser desprezado (TERRIER, 2016).

$$\frac{\Delta p}{h_0} \leq 0,10 \quad \text{Equação 3.29}$$

Pfister e Hager (2010b) analisaram o comportamento do coeficiente  $\beta$  com base em experimentos envolvendo a variação dos parâmetros  $Fr_0$ ,  $\theta$  e  $\alpha$  (Figura 3.15, onde as séries A até L indicam as diversas situações ensaiadas pelos autores) e propuseram a Equação 3.26 (ver Tabela 3.6) para sua estimativa. Os autores obtiveram resultados com forte relação entre  $\beta$ ,  $Fr_0$  e  $\theta$  (conforme Figura 3.15a e Figura 3.15b, respectivamente) e independência do parâmetro com relação à  $\alpha$  (conforme pode ser observado na Figura 3.15c, em que os autores obtiveram curvas independentes para cada situação ensaiada). Ademais, os autores definiram valores mínimos de  $Fr_0$  para que houvesse entrada de ar, sendo  $Fr_0 \approx 4$  a  $5$ , respectivamente, para defletores com  $\theta \approx 11^\circ$  e  $6^\circ$ .

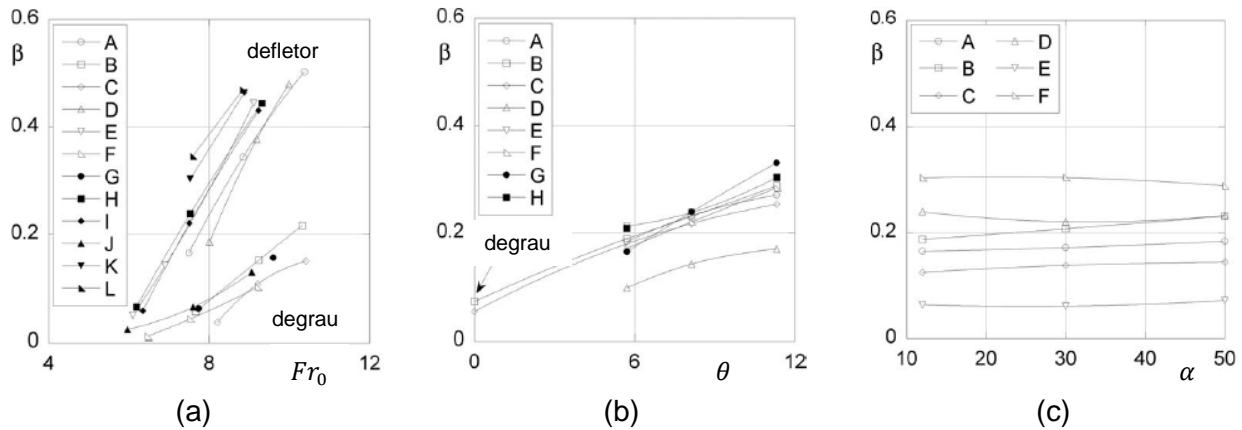


Figura 3.15 – Relação entre o coeficiente  $\beta$  com a)  $Fr_0$ , b)  $\theta$  e c)  $\alpha$ . As séries A até L indicam diferentes casos estudados pelos autores. Adaptado de Pfister e Hager (2010b).

Na Tabela 3.6 há casos que consideram aeradores construídos em vertedouros com canal em degraus, conforme identificado nas notas de rodapé (Equação 3.24, Equação 3.25, Equação 3.27 e Equação 3.28). As demais equações foram desenvolvidas com base em vertedouros de calha lisa. Se forem comparados os intervalos de validade de  $Fr_0$  entre ambos os tipos de calhas (lisas e em degraus), percebe-se que para calhas lisas o intervalo compreende  $Fr_0 \approx 5$  a 25, enquanto nas calhas em degraus esse intervalo é mais limitado e integra a faixa de  $Fr_0 \approx 3$  a 10. Essa observação vai ao encontro do indicado por Pfister et al. (2006b), quando mencionaram que (p. 277):

Comparados a aeradores construídos em calhas lisas, [...] a entrada de ar em aeradores construídos em calhas em degraus ocorre para valores de  $Fr_0$  significativamente baixos. Este é um importante aspecto para projeto, uma vez que calhas em degraus normalmente possuem, no local do aerador,  $Fr_0$  muito menores que calhas lisas.<sup>37</sup>

Mesmo que não tenha sido mencionado pelos autores, entende-se que a afirmação de Pfister et al. (2006b) considere, no caso de calhas em degraus, apenas os aeradores posicionados nas proximidades do início do canal em degraus. Ainda com relação a  $Fr_0$ , Zamora et al. (2008) identificaram que não houve entrada de ar no sistema aerador quando  $Fr_0 < 2,7$ .

Terrier (2016) avaliou o coeficiente  $\beta$  em um vertedouro de calha em degraus. A Figura 3.16 apresenta os resultados de Terrier (2016) comparados aos provenientes do uso da Equação 3.26, sugerida por Pfister e Hager (2010b), onde é possível observar que os valores de Terrier (2016) superam os da Equação 3.26 para situações em que  $3,2 \leq Fr_0 \leq 5,5$ . Assim, Terrier (2016, p. 91) conclui que “[...] se comparado com os resultados que seriam obtidos em vertedouro constituído por calha lisa, o aerador no vertedouro com calha em degraus mostrou, para menores  $Fr_0$ , maiores coeficientes de entrada de ar”<sup>38</sup>. Contudo, Pfister e Hager (2010b) recomendaram o uso da Equação 3.26 para  $5,8 \leq Fr_0 \leq 16,1$  (conforme indicado nas notas de rodapé da Tabela 3.6), mas Terrier (2016) aplicou-a no intervalo  $3,2 \leq Fr_0 \leq 7,5$ , obtendo resultados não muito satisfatórios

<sup>37</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.

<sup>38</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.



justamente para  $3,2 \leq Fr_0 \leq 5,5$ , valores não situados no intervalo recomendado por Pfister e Hager (2010b).

Pela Figura 3.16 é possível inferir que os resultados do coeficiente  $\beta$  de Terrier (2016) apresentam significativa dispersão quando relacionados apenas em função de  $Fr_0$  e de  $\theta$ . O autor propôs, então, a Equação 3.28 (apresentada na Tabela 3.6), função não apenas de  $Fr_0$  e de  $\theta$ , mas também de  $\alpha$ , obtendo menor dispersão entre os dados, conforme pode ser observado na Figura 3.17.

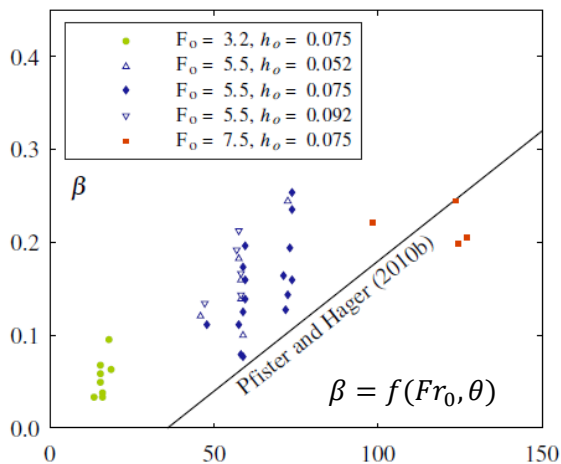


Figura 3.16 – Coeficiente  $\beta$  em função de  $Fr_0$  e  $\theta$ . Adaptado de Terrier (2016).

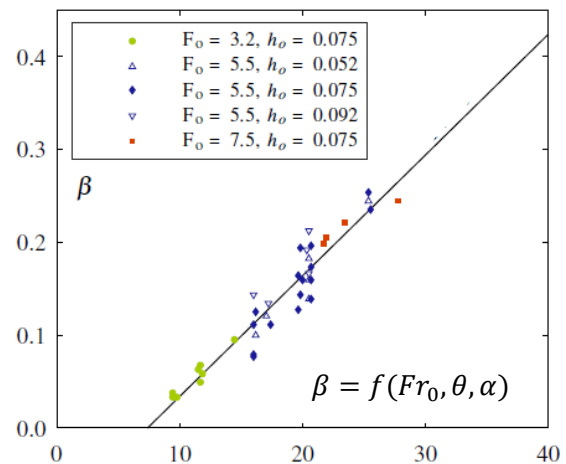


Figura 3.17 – Coeficiente  $\beta$  em função de  $Fr_0$ ,  $\theta$  e  $\alpha$ . Ajuste que resultou na Equação 3.28. Adaptado de Terrier (2016).

De acordo com a Equação 3.28, para uma estrutura de características  $\alpha = 50^0$  e  $\theta = 10^0$ , a entrada de ar iniciará quando  $Fr_0 \approx 2$ . Terrier (2016) menciona, ainda, que degraus de maior altura praticamente não impactaram no aumento do coeficiente  $\beta$ , de modo que a razão entre a altura do degrau  $h_d$  e a profundidade a montante do defletor  $h_o$  não teve influência nos resultados.

A Tabela 3.6 traz equações para estimativa do coeficiente  $\beta$  que foram desenvolvidas tanto em calhas lisas quanto em degraus, como mencionado. Quando o sistema aerador está posicionado imediatamente após a ogiva do vertedouro, o escoamento a montante do sistema aerador é o mesmo independentemente da geometria da calha inclinada (lisa ou em degraus). Além disso, como confirmado por Terrier (2016), o jato do escoamento, formado imediatamente após o sistema aerador, também é semelhante. Porém, há diferenças no coeficiente  $\beta$  medido em sistemas aeradores posicionados a montante de ambos os tipos de calhas, como reportado por Terrier (2016) – e também em conformidade com as equações de previsão apresentadas na Tabela 3.6. O referido autor investigou possíveis equações de previsão de  $\beta$  que pudessem ser aplicadas em calhas lisas ou em degraus, porém, não obteve completo êxito. Desse modo, dado que na região entre o lançamento e o impacto do jato o escoamento é semelhante independentemente da geometria da calha inclinada, Terrier (2016) indicou que a principal diferença está no impacto do jato e no processo de recirculação do escoamento nessa região, o que explica a diferença no coeficiente  $\beta$  medido em calhas lisas ou em degraus.

### 3.4.2 Comprimento do jato $L_j$

Na Equação 3.21, Equação 3.23 e Equação 3.27, apresentadas previamente na Tabela 3.6, o coeficiente  $\beta$  é expresso em função, dentre outros, do comprimento do jato  $L_j$ . O conhecimento de  $L_j$  é importante não apenas na estimativa de  $\beta$ , como também na definição de importantes regiões no escoamento, especialmente no que diz respeito às pressões na estrutura do vertedouro, como já apresentado na Figura 3.12.

Volkart e Rutschmann (1984) sugeriram que  $L_j$  depende principalmente da velocidade do escoamento e da geometria do dispositivo aerador. A estimativa de  $L_j$  pode ser feita tanto por meio de equações teóricas de trajetória de projéteis, quanto por meio de relações empíricas, função de  $Fr_0$  e de características geométricas do modelo e do dispositivo aerador. Algumas das principais relações empíricas estão apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Equações que determinam o parâmetro  $L_j$ .

Autor	Equação	
Kökpınar e Gögüs (2002)	$\frac{L_j}{h_0} = 0,28 Fr_0^{1,75} (1 + \sen \theta)^{0,22} \left(\frac{t+d}{h_0}\right)^{0,44} \left[(1 + \tan \alpha) \frac{A_a}{A_w}\right]^{-0,087}$	Equação 3.30 <sup>39</sup>
Pfister e Hager (2010a)	$\frac{L_j}{h_0} = 0,77 Fr_0 (1 + \sen \alpha)^{1,5} \left(\sqrt{\frac{t+d}{h_0}} + Fr_0 \tan \theta\right)$	Equação 3.31 <sup>40</sup>
Pfister et al. (2006a)	$\frac{L_j}{h_c} = 0,16 \left(\frac{h_c}{Z_{ogiva}}\right)^{-2} (\sen \alpha)^{-1}$	Equação 3.32 <sup>41</sup>
Terrier (2016)	$\frac{L_j}{h_0} = 0,5 (1 + \sen \alpha)^2 (1 + \tan \theta)^4 Fr_0^{1,4} \left(\frac{t}{h_0}\right)^{0,4}$	Equação 3.33 <sup>42</sup>

onde

$Z_{ogiva}$  é a distância vertical desde a crista do vertedouro até o primeiro degrau da calha [m].

Todas as equações apresentadas na Tabela 3.7 são válidas apenas quando a subpressão  $\Delta p$  pode ser desprezada.  $L_j$  é sensível a  $\Delta p$ , de modo que  $\Delta p \neq 0$  (isto é, diferente da pressão atmosférica local) ocasiona a deflexão do jato e, em casos especiais, pode inclusive submergir o dispositivo adutor. Para os casos em que  $\Delta p$  não pode ser desconsiderado, isto é, quando a Equação 3.29 não for satisfeita, Pfister (2011) estabeleceu a Equação 3.34, que apresenta a relação de  $L_j$  com e sem a influência de  $\Delta p$ .

$$\frac{L_{j\Delta p}}{L_j} = e^{-0,85 \frac{\Delta p}{h_0}} \quad \text{Equação 3.34}$$

onde

$L_{j\Delta p}$  é o comprimento do jato quando  $\Delta p \neq 0$  [m].

<sup>39</sup> Calha lisa,  $5,56 \leq Fr_0 \leq 10$ .

<sup>40</sup> Calha lisa,  $5,8 \leq Fr_0 \leq 10,4$ ,  $12^\circ \leq \alpha \leq 50^\circ$ ,  $0^\circ \leq \theta \leq 11,3^\circ$ ,  $0,1 \leq (t+d)/h_0 \leq 2,1$ .

<sup>41</sup> Calha em degraus,  $2,7 \leq Fr_0 \leq 5,8$ ,  $\alpha = 50^\circ$ ,  $h_d = 0,093 \text{ m}$ ,  $\theta = 8,13^\circ$ ,  $t = 0,008 \text{ m}$ .

<sup>42</sup> Calha em degraus,  $\alpha = 30^\circ$  e  $50^\circ$ ,  $h_d = 0,03$  e  $0,06 \text{ m}$ ,  $0,052 \text{ m} \leq h_0 \leq 0,092 \text{ m}$ ,  $0,015 \text{ m} \leq t \leq 0,045 \text{ m}$ ,  $3,2 < Fr_0 < 10,4$ .

### 3.4.3 Concentração de ar no escoamento

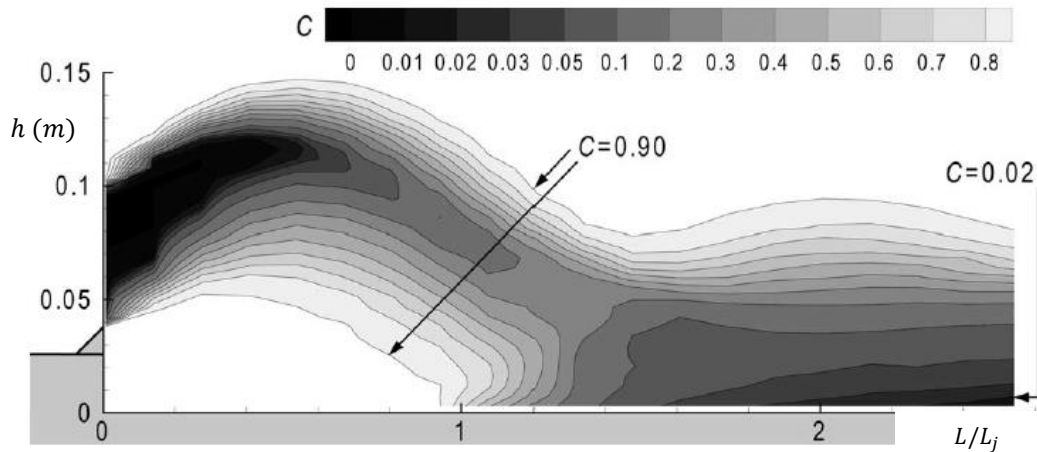
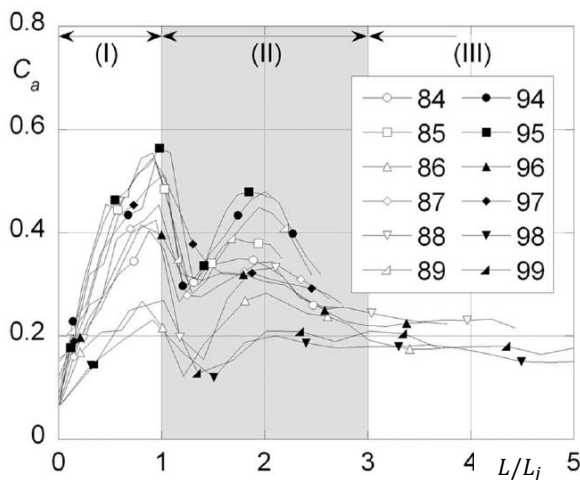
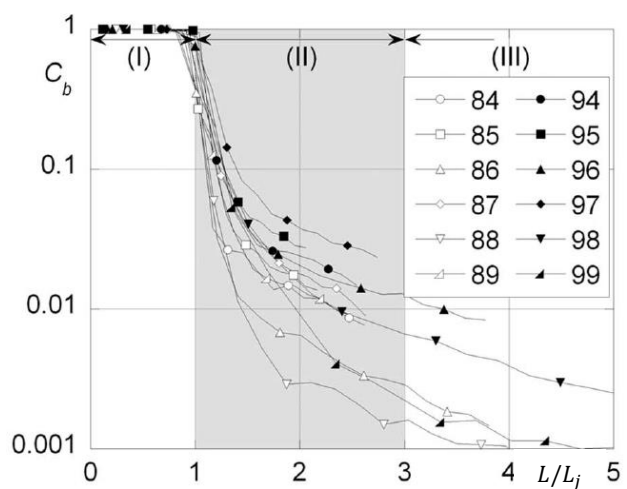
Nos itens 3.4.1 e 3.4.2 foram mencionados aspectos relacionados ao coeficiente  $\beta$  e ao comprimento do jato  $L_j$ . Ambos podem ser determinados com base em equações empíricas em função, principalmente, das características do sistema aerador e do escoamento, conforme apresentado na Tabela 3.6 e na Tabela 3.7. Embora ambos os parâmetros ( $\beta$  e  $L_j$ ) sejam relevantes no que diz respeito à caracterização do escoamento de modo geral, não são significativos na caracterização da distribuição da concentração de ar  $C$  no escoamento.

De acordo com Pfister e Hager (2010b), no contexto da prevenção da ocorrência do fenômeno da cavitação, o conhecimento da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  é primordial. Pfister (2011) mencionou que, com relação aos dados apresentados por Pfister e Hager (2010a, b), nenhuma relação entre  $\beta$  e  $C_b$  foi proposta devido à baixa correlação entre os dados.

Neste tópico apresentam-se informações relacionadas às características do escoamento no que diz respeito à distribuição da concentração de ar, tanto em vertedouros constituídos por calhas lisas quanto em degraus. As definições de  $C$ ,  $C_a$ ,  $C_{ai}$ ,  $C_{au}$ ,  $C_b$  e  $C_{bu}$  são as mesmas que as identificadas para a situação de aeração natural (item 3.1.1). Além de poder ser calculada pela Equação 3.1 (item 3.1.1), a estimativa da concentração de ar média no escoamento  $C_a$  também pode ser feita utilizando-se a Equação 3.35.

$$C_a = \frac{\beta}{\beta + 1} = \frac{Q_{ar}}{Q_{ar} + Q_{\acute{a}gua}} \quad \text{Equação 3.35}$$

Pfister e Hager (2010a, b) apresentaram resultados de  $C$ ,  $C_a$  e  $C_b$ , para um modelo de vertedouro constituído por calha lisa com sistema aerador (composto por degrau com defletor e duto lateral para entrada de ar). Os principais produtos de Pfister e Hager (2010a) estão exibidos na Figura 3.18, que apresenta os perfis de  $C$ ,  $C_a$  e  $C_b$ , para escoamento com  $Fr_0 = 9,1$ , onde  $L/L_j$  representa a razão entre a posição analisada e a posição de impacto do jato.

a)  $C$  ao longo da profundidade e da calha.b)  $C_a$  ao longo da calha.c)  $C_b$  ao longo da calha.Figura 3.18 – Concentração de ar no escoamento em relação a  $L/L_j$ . Adaptado de Pfister e Hager (2010a).

Analisando-se a Figura 3.18 é possível destacar as principais conclusões dos autores, conforme segue (PFISTER E HAGER, 2010a):

- i. O transporte de ar a jusante de um sistema aerador pode ser subdividido em três zonas, sendo a zona de lançamento e impacto do jato (I), zona de restabelecimento e *spray*<sup>43</sup> (II) e zona distante (III). Tais zonas podem ser delimitadas em função da razão  $L/L_j$ , sendo zona I em  $0 \leq L/L_j \leq 1$ , zona II em  $1 < L/L_j < 3$  e zona III em  $L/L_j \geq 3$ , conforme indicado na Figura 3.18b e Figura 3.18c;
- ii. A zona I é caracterizada pelo desmembramento do jato. Nessa região,  $C_a \approx 0,10$  em  $L/L_j = 0$  e aumenta consideravelmente até  $L/L_j = 1$ , ao passo que  $C_b = 1$  em toda a região, conforme esperado, devido ao lançamento do jato sobre a estrutura;

<sup>43</sup> Destaca-se que a zona de *spray* de Pfister e Hager (2010a) não coincide com a indicada por Pinto et al. (1982), Volkart e Rutschmann (1984) e Chanson (1989), apresentada na Figura 3.12. Enquanto esta diz respeito a uma parcela da região localizada sob o jato, a de Pfister e Hager (2010a) está relacionada com a região a jusante do impacto. Salienta-se também que as classificações dos autores dizem respeito a características distintas: enquanto uma classifica as regiões do escoamento de modo geral, a outra aborda os aspectos relacionados, em especial, ao transporte de ar.

- iii. A zona II possui duas regiões distintas no que diz respeito a  $C_a$ : na parcela  $1 < L/L_j < 1,25$  há uma queda considerável nos valores de  $C_a$ , dado que essa região corresponde à compressão sofrida pelo escoamento no impacto do jato e consequente processo de perda de ar, conforme já observado por Chanson (1989). Nessa parcela, o mesmo é observado para  $C_b$ . Já na parcela  $1,25 \leq L/L_j < 3$ , caracterizada pelo *spray* do escoamento, ocorre acréscimo nos valores de  $C_a$ , especialmente devido ao ar absorvido pelo escoamento nas proximidades da superfície, ao passo que  $C_b$  reduz consideravelmente, de modo que, em  $L/L_j \approx 3$ ,  $C_b \approx 0,01$  ou menos;
- iv. Na zona III,  $C_a$  permanece aproximadamente constante, assim como a superfície do escoamento. Entretanto, os valores de  $C_b$  ainda reduzem drasticamente.

Ainda de acordo com a Figura 3.18, destaca-se que  $C_a$  e  $C_b$  são máximos em  $L/L_j \approx 1$  (desconsiderando-se, no caso de  $C_b$ , a parcela de escoamento sem contato com a calha) conforme já sugerido, entre outros, por Chanson (1989).

Adicionalmente, Pfister e Hager (2010b) propuseram equações empíricas que definem  $C_a$  e  $C_b$  para as zonas I, II e III sugeridas por Pfister e Hager (2010a). De acordo com as equações propostas, os autores concluíram que os parâmetros que influenciam no transporte de ar a jusante de sistemas aeradores são, principalmente,  $Fr_0$ ,  $\alpha$  e  $\theta$ .

Os estudos de Pfister e Hager (2010a, b) dizem respeito às características do escoamento em vertedouros com canais lisos. Por esse motivo, no presente trabalho optou-se por apresentar mais detalhadamente somente os aspectos relacionados às classificações do escoamento, apenas mencionando a existência das equações empíricas para estimativa de concentração de ar, sem apresentá-las. Na sequência, apresentam-se mais detalhadamente os estudos envolvendo aeração induzida em vertedouros com canal em degraus, objeto de estudo desta Tese.

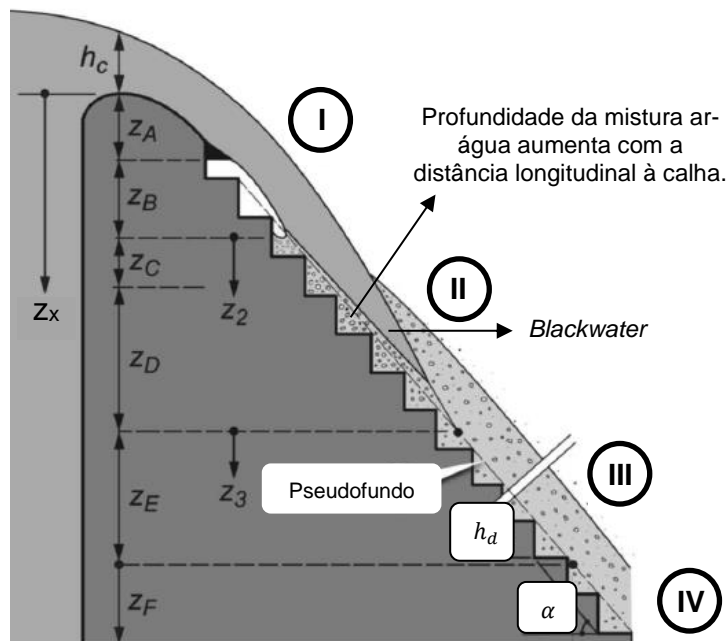
Devido à dinâmica do escoamento sobre vertedouros em degraus, Pfister et al. (2006a) indicaram que os primeiros degraus são propensos a danos decorrentes da cavitação, em virtude da ausência de ar no fundo da estrutura, a montante da seção onde a aeração natural atinge o fundo do escoamento. Os autores ainda mencionaram que a afirmação é válida para vazões específicas elevadas. Entretanto, conforme já discutido, sabe-se que não há consenso quanto ao limite de vazão específica para que esta seja considerada “elevada” em vertedouros em degraus: enquanto Amador et al. (2009) indicaram até  $15 \text{ m}^2/\text{s}$ , Boes e Hager (2003b) consideraram o valor de  $25 \text{ m}^2/\text{s}$ , por exemplo (conforme já apresentado na Tabela 3.5). Pesquisadores ainda indicam que (TERRIER, 2016, p. 1):

Ao longo dos últimos anos, as vazões específicas em vertedouros em degraus têm aumentado significativamente. Vazões específicas que superam  $30 \text{ m}^2/\text{s}$  já não são mais consideradas raras. Nessas situações, o início do canal em degraus está

suscetível aos riscos causados pela cavitação. Este risco pode ser reduzido com a instalação de um dispositivo aerador no primeiro degrau do canal.<sup>44</sup>

Nessas estruturas, a região nas proximidades do ponto de início de aeração – sujeita a altas velocidades – é considerada crítica em termos de danos por cavitação, já que aí ainda não há aeração natural (AMADOR et al., 2005; TERRIER, 2016). Vazões elevadas contribuem com condições propícias à ocorrência de cavitação ao longo do trecho que inicia no primeiro degrau e se estende até as proximidades do início de aeração (ZAMORA et al., 2008). Tozzi et al. (1998) mencionaram que um aerador posicionado no início do canal em degraus pode auxiliar na aeração do escoamento, de modo a minimizar os possíveis riscos associados à ocorrência de cavitação nos degraus, a montante do início da aeração natural.

Pfister et al. (2006a) estudaram o escoamento sobre um vertedouro em degraus com aeração induzida, considerando a instalação de aeradores do tipo defletor no início da calha em degraus. De acordo com os autores, o local de início de aeração do escoamento ocorre mais a montante para um vertedouro em degraus com sistema aerador, se comparado com uma estrutura semelhante sem aerador. Os autores classificaram as regiões do escoamento, conforme representado na Figura 3.19, considerando vazões específicas de  $0,11 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,86 \text{ m}^2/\text{s}$ .



Sendo as regiões<sup>45</sup>:

- I) Apenas água (ao longo de  $Z_A$ ) e de comprimento do jato ( $Z_B$ );
- II) Transição (ao longo de  $Z_C$  e  $Z_D$ );
- III) Escoamento em desenvolvimento ( $Z_E$ );
- IV) Escoamento uniforme ( $Z_F$ ).

Figura 3.19 – Regiões do escoamento em um vertedouro em degraus com sistema aerador. Representação esquemática em vista lateral. Adaptado de Pfister et al. (2006a).

<sup>44</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa. Este fragmento foi escrito pelos pesquisadores Anton Schleiss e Michael Pfister, autores do prefácio de Terrier (2016).

<sup>45</sup> A nomenclatura das regiões foi traduzida para a língua portuguesa.

Pode-se destacar que o escoamento sobre a estrutura em degraus com sistema aerador tem aspecto distinto quando comparado ao que é observado em um canal liso com sistema aerador (apresentado na Figura 3.12). A jusante do defletor tem-se a zona em que o escoamento de água está confinado entre porções de mistura ar-água, parcela denominada de *blackwater*. Destaca-se que, para o caso de canal em degraus, existe ar no fundo do escoamento mesmo nas regiões mais afastadas do sistema aerador (zonas III e IV), diferentemente do que acontece no caso de canais lisos (ver Figura 3.12). Isso acontece devido à dinâmica do escoamento sobre vertedouros em degraus: os degraus contribuem como rugosidades ao longo da calha, antecipam o afloramento da camada limite turbulenta e favorecem o alcance do ar, proveniente da superfície, até mesmo no fundo do escoamento (nas proximidades da estrutura), diferentemente do caso de canais lisos.

Pfister et al. (2006a) também desenvolveram equações que estimam a concentração de ar no fundo do escoamento ( $C_b$ ), conforme ilustrado na Figura 3.20, onde a numeração diz respeito à cada uma das regiões identificadas na Figura 3.19.

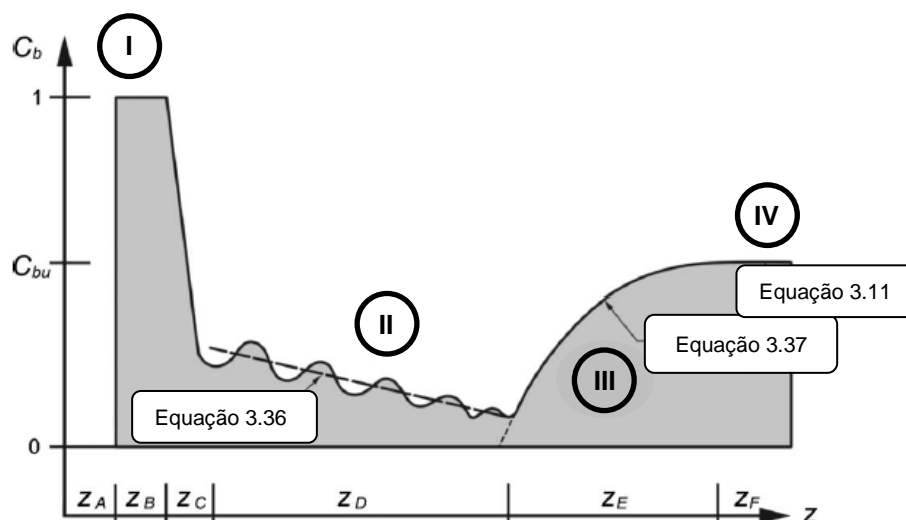


Figura 3.20 – Perfil de concentração de ar longitudinal, no fundo do escoamento, sobre um vertedouro em degraus com sistema aerador. Adaptado de Pfister et al. (2006a).

De acordo com a Figura 3.20 é possível destacar que (PFISTER et al., 2006a):

- i. Na região I, caracterizada pelo escoamento a montante do impacto do jato, a concentração de ar no fundo é mínima na extensão  $Z_A$  (parcela em que o escoamento está em contato com a estrutura) e máxima na extensão  $Z_B$ , devido ao salto do escoamento sobre os degraus, imediatamente a jusante do dispositivo aerador;
- ii. A região II caracteriza-se por um decréscimo abrupto no perfil de concentração de ar em  $Z_C$  (proximidades do impacto do jato). Isso ocorre devido à compressão sofrida pelo escoamento e consequente expulsão do ar no impacto do jato (TERRIER, 2016). Na sequência, ao longo de  $Z_D$ , a concentração de ar também reduz, contudo, gradativamente e não de forma abrupta. Em  $Z_D$ , a profundidade da mistura ar-água nas

proximidades da estrutura tende a aumentar, como indicado na Figura 3.19, porém, devido à existência da *blackwater*, o ar inserido pelo sistema aerador permanece confinado. Nesse intervalo, portanto, devido ao aumento da profundidade da mistura e à manutenção da quantidade de ar, a concentração de ar no fundo reduz gradativamente, como sugere a Figura 3.20. Para essa região, os autores propõem o uso da Equação 3.36 para estimativa de  $C_b$ ;

- iii. A região III é caracterizada pelo incremento no perfil de concentração de ar no fundo, uma vez que o ar da superfície livre é capaz de atingir as proximidades da estrutura do vertedouro. Nessa região, os autores indicam o uso da Equação 3.37;
- iv. Finalmente, na região IV, diz-se que o escoamento atingiu a condição de equilíbrio e, conseqüentemente, a concentração de ar no fundo permanece praticamente constante (tem-se  $C_{bu}$ ). Para estimativa de  $C_{bu}$ , Pfister et al. (2006a) sugeriram o uso da Equação 3.11, proposta por Boes (2000) e estabelecida a partir de ensaios em vertedouro em degraus submetido à aeração natural (já apresentada no item 3.1.1).

$$C_b \frac{h_c}{h_d} = 0,1 \cdot 10^{-0,035n} \quad \text{Equação 3.36}$$

$$\frac{C_b}{C_{bu}} = \tanh \left[ 0,22 \frac{Z_3}{h_d} \right] \quad \text{Equação 3.37}$$

onde

$n$  é o número do degrau;

$Z_3$  é a coordenada vertical na região III (ver Figura 3.19) [m].

No que diz respeito aos perfis de concentração de ar no fundo, o comportamento do escoamento nas regiões III e IV não é alterado substancialmente com a instalação do sistema aerador, em comparação aos perfis de concentração de ar em estrutura semelhante sem aerador (PFISTER et al., 2006a).

Conforme sugere a Figura 3.19, a extensão de  $Z_B$  corresponde ao comprimento do jato, ao passo que  $Z_C = 1,5 h_d$  independentemente da vazão, de acordo com Pfister et al. (2006a). Já a extensão da zona  $Z_D$  pode ser estimada pela Equação 3.38.

$$\frac{Z_D}{h_d} = 1,5 \left( \frac{h_c}{h_d} \right)^2 \quad \text{Equação 3.38}^{46}$$

Pela Figura 3.19, tem-se que  $Z_D$  pode se estender para além do final da zona de *blackwater*. À primeira vista esse fato não parece razoável, uma vez que é de se esperar que, ao final da *blackwater*, com a interação entre o escoamento inferior (proveniente do aerador) e superior (proveniente da superfície), ocorra o incremento de  $C_b$  a partir de então (e não apenas mais a jusante). A Equação 3.36 representa o comportamento médio dos dados medidos pelos autores,

<sup>46</sup> Válida no intervalo  $1 < h_c/h_d < 3$ .



além disso, parece ter sido estabelecida no sentido de resultar em valores de  $C_b$  favoráveis à segurança. Ainda que aparentemente devesse ocorrer o incremento em  $C_b$  imediatamente após o final da *blackwater*, esse comportamento não é mandatório, não tendo ocorrido na totalidade dos casos avaliados por Pfister et al. (2006a). Assim, a aplicação da Equação 3.36 indicará resultados de  $C_b$  que podem ser favoráveis à segurança, em alguns casos, a jusante do final da *blackwater*.

Ainda com relação ao ponto onde ocorre o incremento abrupto em  $C_b$  (isto é, nas proximidades de  $Z_3 = 0$ , ver Figura 3.19), de acordo com os autores, esse ponto coincide, na média e aproximadamente, com o ponto de início de aeração em vertedouros submetidos à aeração natural – com base em comparações entre os resultados de Pfister et al. (2006a), de aeração induzida, e os de Boes e Hager (2003b), de aeração natural.

Quanto ao local de instalação do defletor, uma vez que a porção não aerada em vertedouros em degraus acontece nas proximidades da ogiva, pesquisas envolvendo dispositivos aeradores consideram, de modo geral, sua instalação no primeiro degrau da calha, conforme trabalhos de Pfister et al. (2006a, b), Mojtaba et al. (2015), Terrier et al. (2015), Novakoski (2021), entre outros. Entretanto, Zamora et al. (2009) mencionaram que o trecho influenciado pela presença do aerador pode ser limitado e, nesses casos, a instalação de um segundo sistema aerador pode ser necessário. Assim, entende-se que o segundo aerador pode ser mais eficiente do que o primeiro, no que diz respeito à inserção de ar no escoamento, uma vez que o coeficiente  $\beta$  é fortemente influenciado por  $Fr_0$  (como já discutido e apresentado na Tabela 3.6), que aumenta conforme o deslocamento do aerador no sentido de jusante ao longo da calha.

De modo semelhante ao realizado por Pfister et al. (2006a, b), Terrier (2016) analisou o comportamento do escoamento sobre vertedouros em degraus com dispositivo aerador do tipo defletor, variando desde parâmetros do escoamento<sup>47</sup> até a geometria dos elementos<sup>48</sup>. O autor contemplou a possibilidade de instalação do sistema aerador em posições mais a jusante na calha, por meio da adoção de um dispositivo (*jetbox*<sup>49</sup>) capaz de restringir a profundidade do escoamento para uma determinada vazão. Desse modo, Terrier (2016) teve condições de analisar o desempenho do sistema aerador para diferentes condições do escoamento e, inclusive, diferentes posicionamentos em um caso real (vale destacar, entretanto, que a proposta considerou a existência de canal liso a montante do sistema aerador). O autor contemplou, em especial, aspectos que dizem respeito às características do jato e à concentração de ar no escoamento. Parte dos principais resultados de Terrier (2016) está apresentada na Figura 3.21, que exhibe a concentração de ar no escoamento em função da razão  $L/L_j$ . Na Figura 3.21, as séries em linha contínua e

<sup>47</sup>  $Fr_0 = 3,2; 5,5 \text{ e } 7,5; h_0 \approx 0,050; 0,075 \text{ e } 0,090 \text{ m}$ .

<sup>48</sup>  $\alpha = 30^\circ \text{ e } 50^\circ; h_d = 0,03 \text{ e } 0,06 \text{ m}; \theta \approx 5,7^\circ; 9,5^\circ \text{ e } 14^\circ; t = 0,015, 0,030 \text{ e } 0,045 \text{ m}$ .

<sup>49</sup> Esse dispositivo permite variar  $Fr_0$  e  $h_0$  de forma independente, adaptando a vazão do escoamento. Assim, diferentes valores de  $h_0$  foram avaliados com o mesmo  $Fr_0$ , e diferentes  $Fr_0$  com o mesmo  $h_0$ .

tracejada dizem respeito, respectivamente, a ensaios cujo número de Weber do escoamento ( $We$ )<sup>50</sup> resultou maior e menor do que 100 (casos em que  $We < 100$  podem estar sujeitos a efeitos de escala não desprezáveis nos resultados, assunto abordado no item 3.5).

O autor definiu as zonas do escoamento em vertedouros em degraus com dispositivo aerador do mesmo modo como Pfister e Hager (2010a) o fizeram para calha lisa (já apresentado e discutido na Figura 3.18), conforme indicado na Figura 3.21 (zonas I, II e III, que dizem respeito, respectivamente, às regiões de lançamento do jato, de restabelecimento e distante).

Ainda com relação à Figura 3.21, destaca-se que Terrier (2016) apresentou os dados de  $C_a$  e  $C_b$  em razão de  $C_{au}$  e  $C_{bu}$ , que considerou como sendo equivalentes a, respectivamente, 0,55 e 0,32. Assim, com base na Figura 3.21b, excetuando-se os resultados associados aos ensaios onde  $We < 100$ , os menores valores encontrados de  $C_b$  são cerca de 50% de  $C_{bu}$  ( $C_b/C_{bu} \approx 0,50$ ). Então, dado que  $C_{bu} \approx 0,32$ , os valores mínimos de  $C_b$  medidos por Terrier (2016) são da ordem de 0,15, que excede consideravelmente os valores mínimos recomendados na literatura para evitarem-se danos por cavitação – da ordem de 7%, como indicado por Peterka (1953) e exposto no item 3.3.

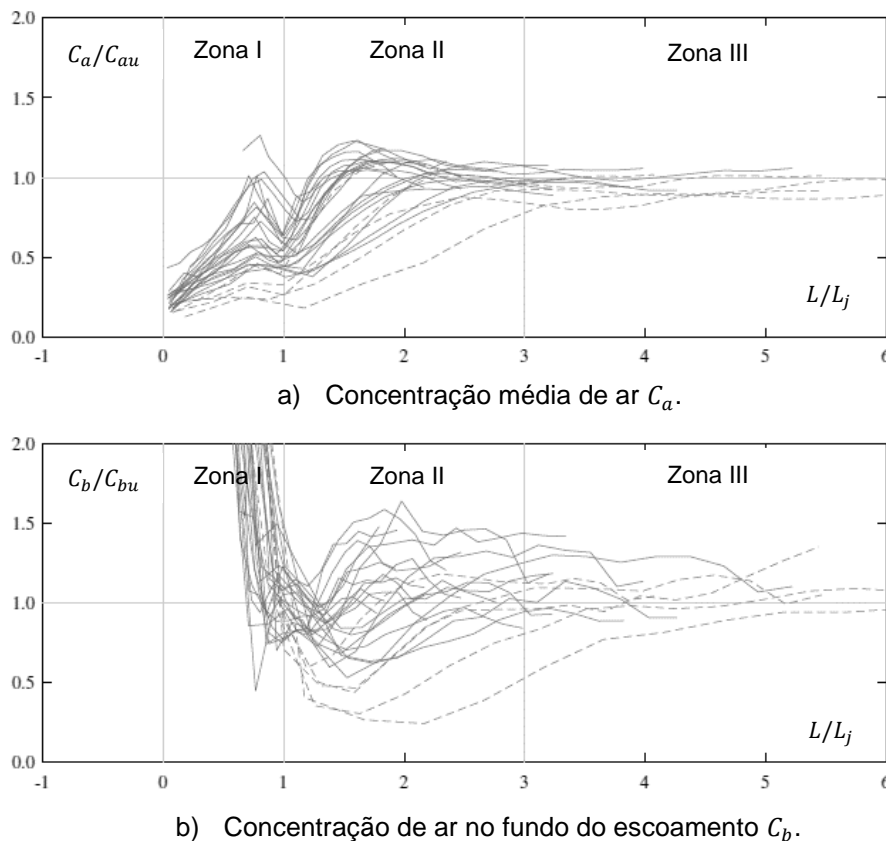


Figura 3.21 – Razão entre a concentração de ar a) média  $C_a$  e b) no fundo  $C_b$ , com a concentração de ar no escoamento quase uniforme  $C_{au}$  e  $C_{bu}$ , ao longo da calha em degraus, para  $\alpha = 50^\circ$ . As séries em linha contínua e tracejada dizem respeito, respectivamente, a ensaios com  $We$  maior e menor do que 100. Adaptado de Terrier (2016).

<sup>50</sup> Mais detalhes quanto ao número de Weber constam no item 3.5.

No que diz respeito ao comportamento dos perfis de concentração de ar, os resultados de Terrier (2016) são compatíveis àqueles já indicados por Pfister et al. (2006a). Contudo, quantitativamente, os resultados de  $C_b$  obtidos por Terrier (2016) são superiores aos de Pfister et al. (2006a), o que o autor justifica como sendo devido às significativas diferenças entre a altura do defletor  $t$  e o comprimento do jato  $L_j$  entre ambos os trabalhos.

Assim como Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) também estabeleceu um modelo para previsão da concentração de ar ao longo da calha, tanto em termos de  $C_a$  quanto  $C_b$ . A partir dos dados medidos, Terrier (2016) identificou que o comportamento de  $C_b$  é bem representado por pontos característicos (associados aos valores mínimo  $C_{b\ min}$ , máximo  $C_{b\ max}$  e uniforme  $C_{bu}$ ), que estão expostos, a título de exemplo, na Figura 3.22 (para casos que consideram vazões específicas em protótipo  $q_p$  iguais a 19,5 m<sup>2</sup>/s e 60 m<sup>2</sup>/s).

Como sugere a Figura 3.22, o ponto associado à  $C_{b\ max}$  não representa o valor máximo global da série de  $C_b$ , mas sim, o valor máximo local, estando associado à região influenciada pelo impacto do jato e restabelecimento do escoamento na calha (em  $C_{b\ min} < C_b < C_{bu}$ ). Além disso, a depender da vazão avaliada, o resultado de  $C_{b\ max}$  é, inclusive, inferior à  $C_{bu}$  (ver Figura 3.22b).

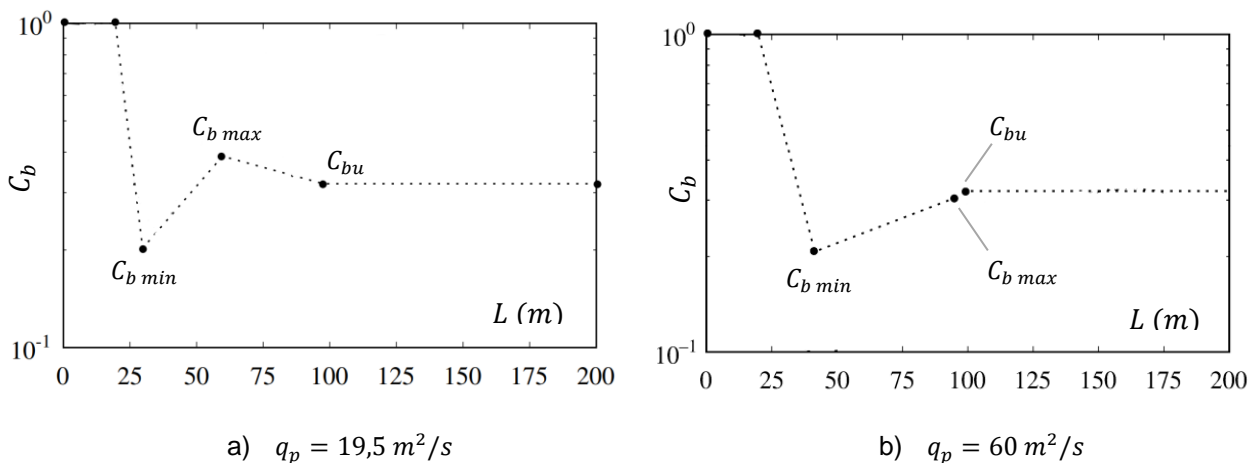


Figura 3.22 – Representação da distribuição da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ , ao longo da calha, conforme modelo proposto por Terrier (2016). A conexão entre os pontos característicos é indicativa. Adaptado de Terrier (2016).

As equações que estimam os valores de  $C_b$ , por Terrier (2016), e sua respectiva posição na calha aparecem na Tabela 3.8 e Tabela 3.9.

Tabela 3.8 – Equações propostas por Terrier (2016) para estimativa dos valores de  $C_b$ .

$C_b$	Equação	
Mínimo	$C_{b\ min} = 0,184 (\sen \alpha)^{1,4} (1 + \tan \theta) Fr_0^{0,3} \left(\frac{t}{h_0}\right)^{0,15} \left(\frac{h_d}{h_0}\right)^{-0,3}$	Equação 3.39
Máximo	$C_{b\ max} = 0,502 (\sen \alpha)^{1,5} Fr_0^{0,2} \left(\frac{t}{h_0}\right)^{0,25} \left(\frac{h_d}{h_0}\right)^{-0,1}$	Equação 3.40
Uniforme	$C_{bu} \approx 0,32$	Equação 3.41

Tabela 3.9 – Equações propostas por Terrier (2016) para estimativa da posição onde ocorrem os valores de  $C_b$  (estimados, por sua vez, com base nas equações indicados na Tabela 3.8).

Posição	Equação	
Mínimo	$\frac{L C_{b \min}}{L_j} = 3,22 (1 + \operatorname{sen} \alpha)^{-1} (1 + \tan \theta)^{-1,75} Fr_0^{-0,17} \left(\frac{t}{h_0}\right)^{-0,23}$	Equação 3.42
Máximo	$\frac{L C_{b \max}}{L_j} = 53,8 (1 + \operatorname{sen} \alpha)^{-2} (1 + \tan \theta)^{-4} Fr_0^{-1} \left(\frac{h_d}{t}\right)^{0,3}$	Equação 3.43
Uniforme	$\frac{L C_{bu}}{L_j} \geq 4$	Equação 3.44

Parte dos resultados obtidos por Terrier (2016) foram também divulgados mais recentemente, no trabalho cuja referência é Terrier et al. (2022).

Terrier et al. (2015) compararam os resultados de concentração de ar no escoamento entre calha lisa e em degraus, com sistema aerador instalado no início da calha. No caso do canal em degraus, os autores também ensaiaram a situação sem aerador. O sistema aerador é composto por um defletor com  $t \approx 0,015 \text{ m}$  e as principais características dos ensaios, praticamente iguais para as três situações, são  $Fr_0 = 7,5$ ,  $q \approx 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $\alpha = 50^\circ$ . Os principais resultados dos autores estão apresentados na Figura 3.23, onde é possível identificar diferenças consideráveis entre os perfis de concentração de ar da calha em degraus e da calha lisa, aquela apresentando concentração de ar sempre superior a esta, como esperado.

Pela Figura 3.23 também é possível verificar que, no caso do canal em degraus, a concentração de ar no fundo do escoamento não decresceu, mesmo a jusante do impacto do jato, diferentemente do observado no canal liso. Devido a tais resultados, a instalação de um único defletor, para o canal em degraus em questão, seria suficiente. Por outro lado, considerando a calha lisa, pode ser necessária a instalação de maior número de dispositivos aeradores, dependendo dos critérios adotados.

Terrier (2016) analisou com ênfase o comportamento dos perfis de concentração de ar no escoamento sobre o vertedouro, contudo, não realizou a medição de pressões nos degraus. Em suas recomendações, Terrier (2016, p.158) indicou que:

O impacto do jato modifica a distribuição de pressões nos degraus. As pressões devem ser sistematicamente medidas em todos os degraus nas proximidades do impacto do jato para avaliar a ocorrência de picos de pressão negativa.<sup>51</sup>

O tópico seguinte (item 3.4.4) aborda contribuições no que diz respeito à identificação das pressões na superfície da estrutura, em calha lisa e em degraus, considerando vertedouros com aerador.

<sup>51</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.

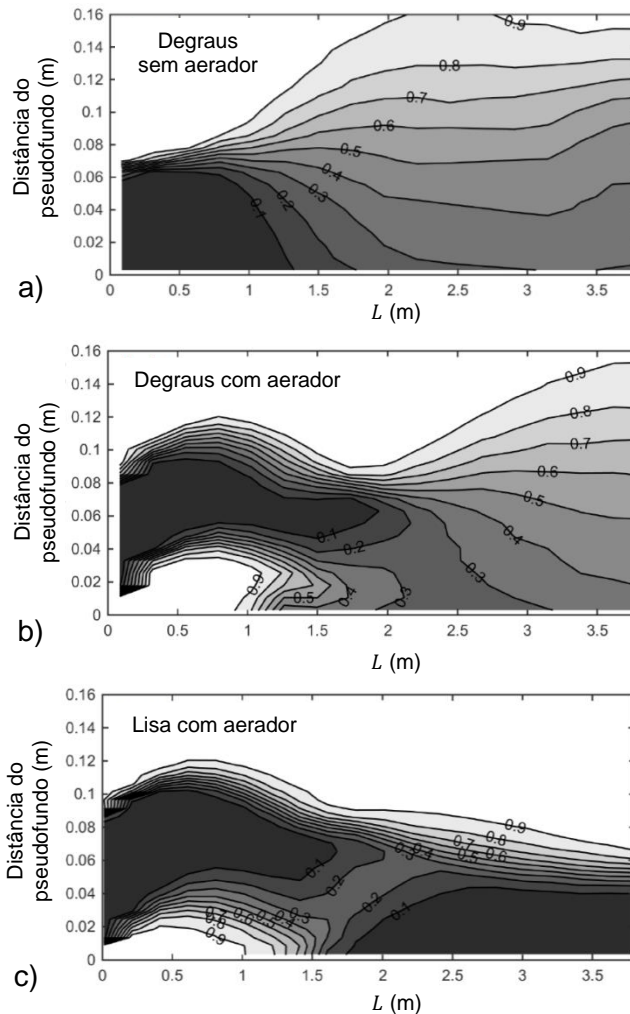


Figura 3.23 – Concentração de ar no escoamento ao longo de vertedouros com calha a) em degraus sem aerador, b) em degraus com aerador e c) lisa com aerador. Adaptado de Terrier et al. (2015).

### 3.4.4 Pressões sobre os degraus

Para o caso de pressões sobre vertedouros em degraus com aeração induzida, serão avaliadas as contribuições de Arantes (2007), Marques et al. (2019), Priebe (2020) e Novakoski (2021).

Arantes (2007), através de estudo por simulação numérica, comparou os resultados de pressão mínima no escoamento sobre um vertedouro em degraus com  $\alpha \approx 53^\circ$  e  $h_d = 0,50$  m, na condição com e sem aerador. O autor indica que, para a condição de escoamento sem aerador, a menor pressão média encontrada foi de cerca de - 3,20 m, ao passo que, para a condição com aerador, o menor valor foi de - 0,74 m (isto é, menos vulnerável à ocorrência de cavitação do que a condição anterior). A vazão específica  $q$  ensaiada por Arantes (2007) foi igual a 11,7 m<sup>2</sup>/s.

As conclusões de Arantes (2007), em modelo numérico, diferem das de Marques et al. (2019), que desenvolveram estudos de pressão média em um modelo físico de vertedouro em degraus com  $\alpha \approx 53^\circ$ . Os autores compararam os resultados obtidos na condição de aeração induzida por sistema aerador (formado por defletor e câmara de ar), instalado no primeiro degrau do canal, com os resultados obtidos na condição de aeração natural. Parte dos resultados de Marques et al. (2019)

está apresentada na Figura 3.24, que indica as pressões médias coletadas na face vertical dos degraus, para  $q_p = 12,6 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $h_d = 0,60 \text{ m}$  – condições escolhidas pela autora, de modo que resultassem mais próximas às de Arantes (2007).

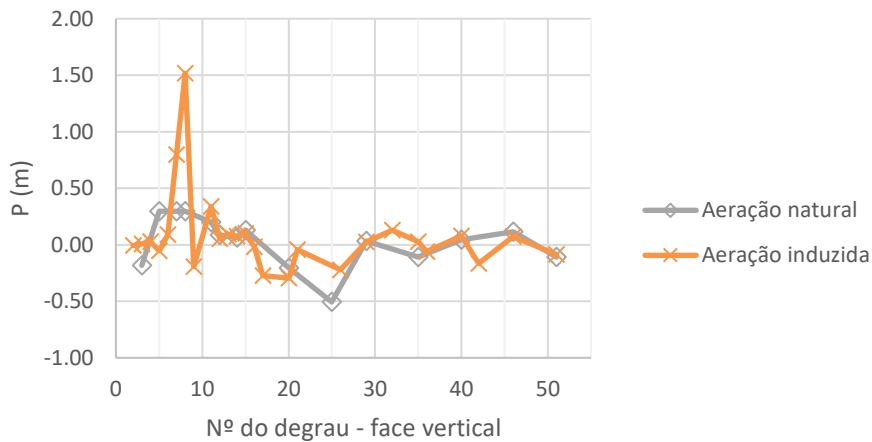


Figura 3.24 – Distribuição longitudinal da pressão média, na face vertical dos degraus, conforme dados de Marques et al. (2019), para  $q_p = 12,6 \text{ m}^2/\text{s}$  (escala de protótipo). Adaptado de Marques et al. (2019).

Pode-se destacar que não houve alteração significativa nos valores de pressão média obtidos por Marques et al. (2019), considerando as condições de aeração natural e induzida, com exceção da parcela do escoamento influenciada pelo lançamento e impacto do jato – jato este que acontece na condição de aeração induzida, apenas. A jusante dessa região, as pressões médias em ambas as condições foram semelhantes, conforme sugere a Figura 3.24. Além disso, a magnitude da menor pressão negativa observadas por Marques et al. (2019) – da ordem de  $-0,50 \text{ m}$ , na condição de aeração natural – é cerca de seis vezes superior à de Arantes (2007), igual a  $-3,20 \text{ m}$ .

Embora as condições ensaiadas por Arantes (2007) e Marques et al. (2019) sejam semelhantes, deve-se destacar que enquanto estes utilizam metodologia experimental, por meio de coleta de dados em modelo físico, o outro obteve seus dados com auxílio de modelo numérico. É possível que isso tenha relação com as diferenças encontradas quando comparados os resultados dos trabalhos. Ressalta-se que ambos os trabalhos se referem apenas à pressão média e, em se tratando da ocorrência do fenômeno da cavitação e consequente dano nas estruturas hidráulicas, as pressões extremas também devem ser analisadas.

Priebe (2020) desenvolveu estudos de aeração induzida por pilares e defletores no escoamento sobre vertedouros em degraus, analisando o comportamento da distribuição longitudinal das pressões (médias e também extremas) sobre os degraus, por meio de estudo experimental. A autora utilizou defletores de diferentes alturas e avaliou tanto os resultados de pressões quanto o aspecto visual do escoamento, nas condições de aeração induzida e natural. A Figura 3.25 apresenta parte de seus resultados da autora – no caso, as pressões nas faces verticais dos degraus, com 0,1% de probabilidade de não serem excedidas ( $P_{0,1\%}$ ), ao longo do comprimento da

calha ( $L$ ), no modelo denominado LOH I. A magnitude dos resultados da Figura 3.25 está associada à escala de modelo físico e a duas vazões específicas, sendo  $q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

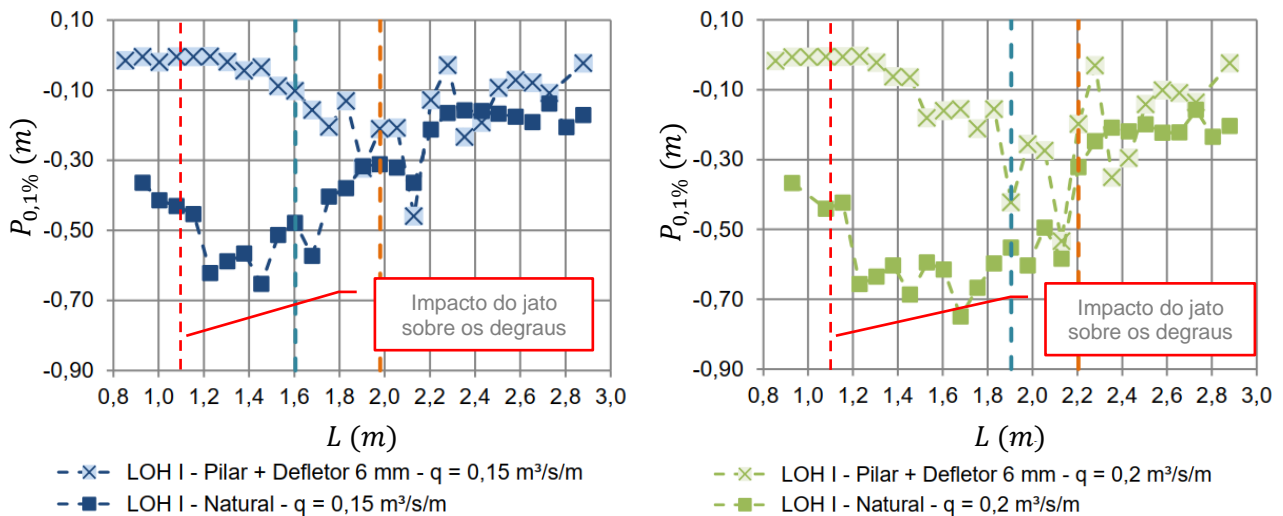


Figura 3.25 – Distribuição longitudinal de  $P_{0,1\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando situações de aeração induzida (“pilar + defletor”) e natural. Adaptado de Priebe (2020), modelo LOH I.

No que diz respeito ao comportamento das pressões extremas  $P_{0,1\%}$  na face vertical dos degraus, os dados de Priebe (2020) indicam diferenças significativas entre os resultados de aeração induzida e natural – não apenas na região influenciada pelo lançamento e impacto do jato sobre os degraus, mas também muito a jusante dela, como sugere a Figura 3.25 (o impacto do jato nos degraus ocorre em  $L \approx 1,10 \text{ m}$ , como indicado).

Priebe (2020) não avaliou a entrada de ar pelo sistema aerador ( $\beta$ ), tampouco a concentração de ar no escoamento – esta, inclusive, é uma das recomendações para trabalhos futuros, sugeridas pela referida autora. Assim, não é possível identificar se, além da redução nas pressões, a instalação do aerador contribuiu também com a incorporação suficiente de ar, de modo a evitarem-se possíveis danos em decorrência da cavitação. Mesmo assim, os dados obtidos por Priebe (2020) são suficientes para indicar que, com a incorporação de ar no escoamento, ocorreu a “amenização” das pressões – o que é coerente com o comportamento esperado, conforme conclusões prévias de Peterka (1953) e Dong e Su (2006), expostas no item 3.3.

Novakoski (2021) analisou experimentalmente as características do escoamento sobre vertedouros em degraus sujeitos à aeração induzida, considerando a instalação de diferentes geometrias de defletor no primeiro degrau da calha. No que diz respeito às pressões hidrodinâmicas sobre os degraus, a autora concluiu que não houve variação significativa entre as pressões observadas no escoamento com aeração induzida e com aeração natural, seja na face vertical ou horizontal dos degraus – com exceção, principalmente, da zona influenciada pelo ponto de impacto do jato. Essa conclusão se aplica tanto às pressões médias quanto extremas (nesse caso,  $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ).

Assim, levando em conta apenas as conclusões obtidas por Marques et al. (2019) e Novakoski (2021), conclui-se que, de modo geral, a aeração induzida não é capaz de alterar a

magnitude das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus, se comparadas com as pressões na condição de aeração natural. Contudo, essa resolução não condiz com o esperado, se consideradas, por exemplo, as conclusões de Peterka (1953), Dong e Su (2006) e até mesmo Priebe (2020) – que observaram aumento nas pressões com o aumento na concentração de ar no escoamento – mesmo para baixas concentrações de ar, da ordem de 5% ou menos. Assim, dado que a condição de aeração induzida é caracterizada justamente pela inserção adicional de ar no escoamento de água (quando comparada à aeração natural), poderia se supor que os dados de pressão medidos na aeração induzida fossem superiores aos da condição de aeração natural.

Contudo, vale destacar que, enquanto Peterka (1953) e Dong e Su (2006) utilizaram instalações experimentais caracterizadas por condutos fechados pressurizados, Marques et al. (2019) e Novakoski (2021) consideram experimentos à superfície livre (onde a superfície do escoamento está em contato com a pressão atmosférica). Assim sendo, pode-se sugerir que a distinção entre os resultados dos autores esteja associada às diferentes condições do escoamento, em razão das particularidades das respectivas instalações experimentais adotadas.

Porém, é curioso que, enquanto os dados de Novakoski (2021) não apontaram variação significativa nas pressões entre as condições de aeração natural e induzida, Priebe (2020) identificou distinções importantes nos valores de pressão extrema  $P_{0,1\%}$  entre as duas condições, até mesmo em porções mais a jusante da zona influenciada pelo impacto do jato nos degraus, como apresentado na Figura 3.25. Ambos os trabalhos consideraram escoamentos à superfície livre, porém, os sistemas aeradores e parte das instalações experimentais adotadas pelas referidas autoras são distintos, o que pode estar associado às diferentes conclusões mencionadas – em razão, possivelmente, de diferenças no montante de ar inserido por cada instalação e sistema adotados.

Assim, em resumo, a partir da análise dos trabalhos que envolvem a avaliação das pressões no escoamento sujeito à aeração induzida, pode-se destacar que:

- i. Considerando escoamentos à superfície livre, há, possivelmente, um valor mínimo de concentração de ar a partir do qual é possível identificar diferenças mais significativas nos valores de pressão hidrodinâmica sobre os degraus, nas duas condições. Isso porque, enquanto Priebe (2020) destacou aumento nas pressões extremas  $P_{0,1\%}$  na condição de aeração induzida (quando comparada à condição de aeração natural), Novakoski (2021) não identificou variações consideráveis (excetuando-se a região influenciada pelo jato);
- ii. É possível que o tipo de instalação experimental adotada (se resultante em escoamento sujeito à superfície livre ou à pressão diferente da atmosférica) altere as conclusões obtidas no que diz respeito à suposta “amenização” das pressões com o aumento da concentração de ar no escoamento.



### 3.4.5 Aspecto visual do escoamento

Neste tópico são feitas considerações adicionais no que diz respeito ao aspecto visual do escoamento sobre vertedouros em degraus sujeitos à aeração induzida. Serão considerados os trabalhos de Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) e Novakoski (2021), por serem os autores que contemplam estruturas e condições mais próximas às do presente trabalho, como será abordado com mais ênfase adiante, nos Capítulos 4 e 5. No que diz respeito ao aspecto do escoamento, parte das contribuições de Novakoski (2021) também constam em Novakoski et al. (2020).

A Figura 3.26 representa esquematicamente o escoamento sobre o vertedouro, conforme abordagens de cada um dos autores mencionados. A ilustração do escoamento de Pfister et al. (2006a) exposta na Figura 3.26 é a mesma que foi apresentada anteriormente, na Figura 3.19.

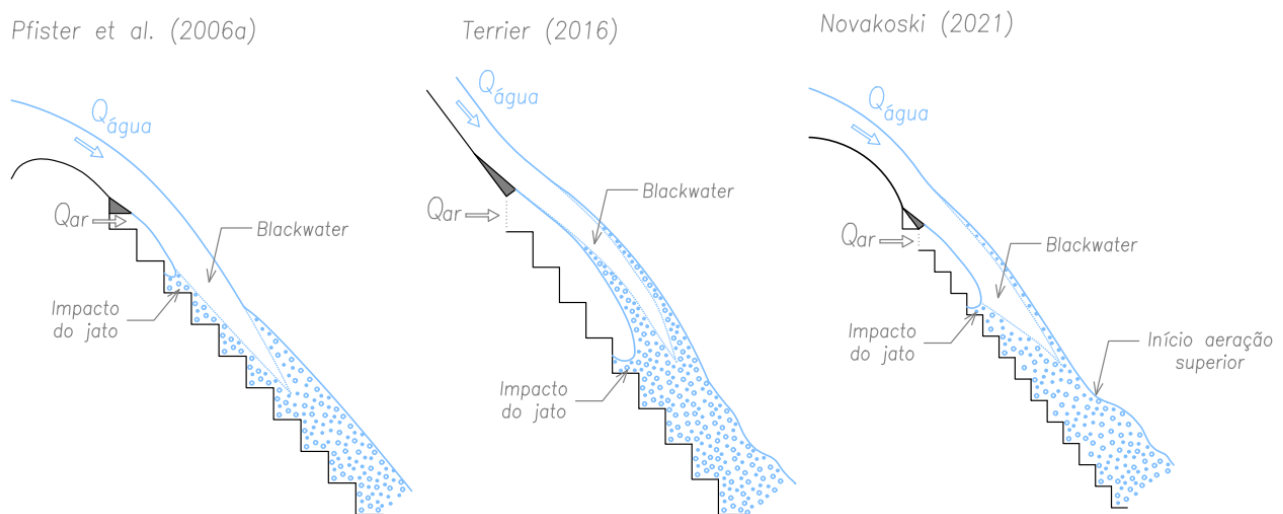


Figura 3.26 – Representação esquemática, em vista lateral, do escoamento sobre vertedouros em degraus com sistema aerador. Adaptado de Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) e Novakoski (2021).

Em conformidade com a Figura 3.26, o aspecto visual do escoamento de Novakoski (2021) é muito semelhante ao indicado por Pfister et al. (2006a): após a passagem do escoamento sobre o defletor e impacto do jato sobre a calha, a *blackwater* segue em desenvolvimento ao longo dos degraus a jusante, e termina no encontro entre a aeração inferior (proveniente do sistema aerador) com a aeração superior (proveniente da atmosfera). Vale ressaltar que tanto Pfister et al. (2006a) quanto Novakoski (2021) realizaram estudos considerando a implantação do sistema aerador imediatamente a jusante da ogiva do vertedouro, no primeiro degrau da calha.

Importante destacar uma peculiaridade entre ambos os trabalhos: Novakoski (2021) identificou que, a jusante do final da *blackwater*, há um trecho em que a linha superficial do escoamento é quase uniforme. Mais a jusante, a autora observou uma região onde a superfície do escoamento adquire aspecto ondulatório, ocorrendo ainda um leve incremento na profundidade, tendo denominado este ponto de “início da aeração superior”. Pfister et al. (2006a) não fez menção a esse comportamento quando da descrição do aspecto visual do escoamento.

Os escoamentos avaliados por Terrier (2016), por sua vez, apresentam características distintas dos outros autores mencionados. Para Terrier (2016), a *blackwater* termina a montante ou próxima do ponto de impacto do jato nos degraus. Desse modo, o encontro entre a aeração inferior e superior ocorre nas proximidades do ponto de impacto do escoamento sobre a calha, de modo que o escoamento já é plenamente aerado (em profundidade) a partir de então.

Assim, a principal diferença no aspecto visual do escoamento entre os três trabalhos aqui avaliados é justamente o desenvolvimento da *blackwater*: enquanto em Pfister et al. (2006a) e Novakoski (2021) existe *blackwater* até mesmo a jusante do impacto do jato sobre a calha, em Terrier (2016) a *blackwater* finaliza a montante ou muito próxima dele (do ponto de impacto do jato). Em Pfister et al. (2006a) e Novakoski (2021), há um trecho em que o núcleo de *blackwater* está confinado entre camadas de escoamento com aeração inferior (proveniente do sistema aerador) e superior (proveniente da superfície).

Enquanto em Pfister et al. (2006a) e Novakoski (2021) há um trecho do escoamento em contato com os degraus cuja aeração é proveniente apenas do sistema aerador (isto é, a jusante do impacto do jato, na parcela do escoamento inferior à *blackwater*), em Terrier (2016) todo o escoamento em contato com os degraus é composto pela aeração inferior e superior em conjunto.

### 3.4.6 Dissipação da energia do escoamento

Autores como Chanson (1993, 1994), Boes e Hager (2003a), entre outros, mencionam que a presença de ar no escoamento reduz o coeficiente de atrito da superfície e, portanto, reduz a dissipação de energia ao longo da calha do vertedouro em degraus. Chanson (1994, p. 456) destaca, ainda, que “[...] para declividades (de calha) maiores do que 30 graus, o efeito da entrada de ar não pode ser desprezado no cálculo da energia residual do escoamento no trecho final do vertedouro.”<sup>52</sup>

Os trabalhos citados dizem respeito à avaliação do escoamento sobre vertedouros em degraus sujeitos à aeração natural. A utilização de sistemas aeradores tem o intuito de inserir quantidades adicionais de ar (com relação ao montante de ar que seria naturalmente inserido pela passagem do escoamento de água sobre a estrutura). Assim, ao considerar a instalação de sistemas aeradores na calha, muito embora se estivesse atuando no sentido de evitar o aparecimento de danos em decorrência da cavitação, poderia se supor que a inserção adicional de ar reduziria a dissipação de energia do escoamento sobre o vertedouro em degraus – isto é, impactaria negativamente em uma das principais vantagens de calhas em degraus frente a calhas lisas.

Contudo, autores que avaliaram a dissipação de energia sobre calhas em degraus, contemplando escoamentos sujeitos tanto à aeração natural quanto induzida, não identificaram variação

---

<sup>52</sup> Trecho traduzido para a língua portuguesa.

significativa na dissipação de energia entre ambas as condições. Dentre esses autores pode-se citar Zamora et al. (2008), Novakoski (2021) e Tassinari (2022).

Zamora et al. (2008) estudaram o comportamento do escoamento sobre um vertedouro em degraus com aerador e compararam seus resultados com os dados de Boes e Hager (2003b), que avaliaram vertedouros em degraus sujeitos à aeração natural. Zamora et al. (2008) concluíram que a dissipação de energia no escoamento com ou sem elementos aeradores foi similar. Zamora et al. (2009) mencionam que os incrementos em  $C_a$  e  $C_b$  na estrutura contendo o dispositivo aerador não foram significativos a ponto de se reduzir o coeficiente de atrito (quando comparados ao escoamento sem aerador), e indicam que esse pode ser um dos motivos pelos quais não houve distinção na dissipação de energia, comparando-se as estruturas com e sem o dispositivo aerador.

Novakoski (2021) também avaliou a dissipação de energia em um escoamento sobre vertedouro em degraus nas condições de aeração natural e induzida (nesse caso, considerando a instalação de um defletor em conjunto com câmara de ar logo a jusante da ogiva). A autora analisou a dissipação de energia segundo diferentes abordagens (pelo comprimento do ressalto hidráulico formado na bacia de dissipação a jusante do vertedouro, pelas pressões na bacia de dissipação e pelo balanço de energia em diferentes seções ao longo da calha e do ressalto hidráulico). De acordo com os resultados de todas as abordagens contempladas, Novakoski (2021) sugere que não houve variação importante na dissipação de energia entre os escoamentos com aeração natural e induzida, do mesmo modo como apontado por Zamora et al. (2008).

Tassinari (2022) também avaliou o comportamento da dissipação de energia, em uma estrutura semelhante a um dos modelos físicos considerados por Novakoski (2021), contudo, neste caso, o autor utilizou uma abordagem com fluidodinâmica computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamic*). Tassinari (2022) mencionou que, ao analisar o efeito da indução de ar no escoamento, foram observadas diferenças “nulas a pequenas” nos valores de dissipação de energia. A Figura 3.27 apresenta parte dos resultados do autor, expondo a razão entre a dissipação de energia do escoamento no final da calha em degraus ( $\Delta E$ ), e a energia a montante ( $E_m$ ). Pela Figura 3.27 vê-se que a diferença média na dissipação de energia entre os escoamentos sujeitos à aeração natural e induzida é da ordem de 5%, contudo, pode atingir a ordem de 20% a 30% em algumas regiões ao longo da calha.

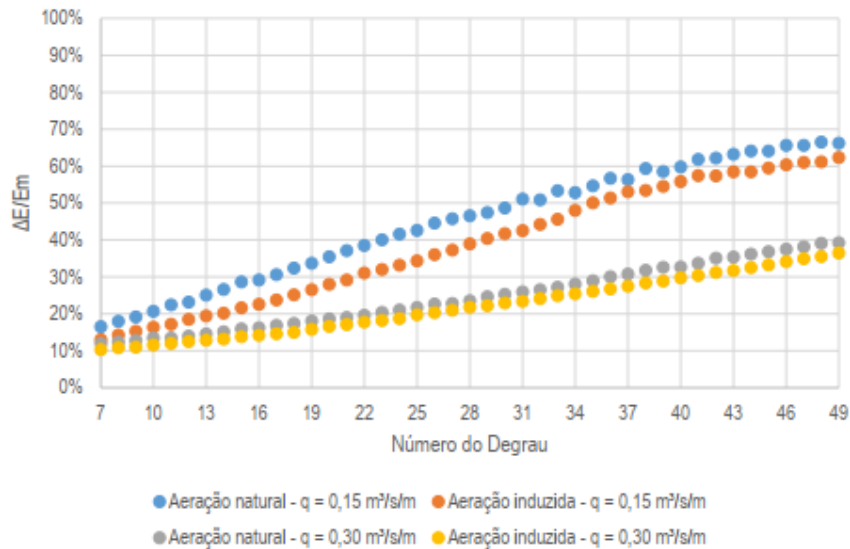


Figura 3.27 – Dissipação de energia ao longo da calha, considerando escoamento sujeito à aeração natural e induzida, para duas vazões específicas ( $q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ ), conforme Tassinari (2022).

Assim, tendo em conta os trabalhos mencionados neste item, pode-se indicar preliminarmente que, de modo geral, em comparação com a condição de aeração natural, não há variação importante na dissipação de energia do escoamento sujeito à aeração induzida. Contudo, deve-se destacar que é possível que tais conclusões estejam diretamente relacionadas com a concentração de ar da mistura – como identificado preliminarmente por Wood (1991). Zamora et al. (2008), Novakoski (2021) e Tassinari (2022) avaliaram sistemas aeradores posicionados nas proximidades da ogiva do vertedouro (no início da calha em degraus) e, assim, associados a um incremento pouco significativo na concentração de ar no escoamento – porém, que pode ser suficiente para a proteção da calha contra os efeitos danosos da cavitação.

Terrier (2016), embora tenha avaliado o comportamento e as características do escoamento sujeito à aeração induzida – e sujeito a concentrações de ar superiores em relação aos valores observados por Zamora et al. (2008) –, não contemplou a análise da dissipação da energia do escoamento nessas condições. Sendo assim, ainda não é possível afirmar se a dissipação da energia do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida será sempre próxima àquela com aeração natural.

### 3.5 EFEITOS DE ESCALA

Analisar características hidráulicas de estruturas construídas em tamanho real é viável, tanto técnica quanto economicamente, através da modelagem física. Essa ferramenta reproduz, em escala reduzida, os fenômenos que seriam observados no protótipo. Porém, devido à impossibilidade de se reproduzir, em uma estrutura de tamanho reduzido, todas as forças que governam os fenômenos físicos sobre uma estrutura em tamanho real, é comum a existência de efeitos de escala na modelagem física. Para contornar esse problema, adotam-se os parâmetros semelhantes, em modelo e em protótipo, que envolvem apenas as forças preponderantes no fenômeno que se

pretende analisar, de modo que os efeitos de escala proporcionados pela não consideração da semelhança das demais forças possam ser desprezados (HELLER, 2011).

Vale ressaltar que, com a redução geométrica da estrutura, sempre ocorrerão efeitos de escala nos resultados. Nesse sentido, a questão relevante a se considerar é em quais situações esses efeitos podem ou não ser desprezados (HELLER, 2011). Para que os efeitos da redução da escala possam ser minimizados (isto é, de modo que os resultados adquiridos representem adequadamente as condições que seriam observadas em protótipo), é necessário que sejam respeitados valores limites dos parâmetros adimensionais não considerados na modelagem física da estrutura.

Na modelagem de escoamentos à superfície livre, onde o movimento é regido predominantemente pela ação da gravidade, adota-se a semelhança do número de Froude ( $Fr$ , Equação 3.45) entre modelo e protótipo. Entretanto, em escoamentos formados por água e ar (aspecto característico do escoamento plenamente desenvolvido sobre vertedouros), a viscosidade e a tensão superficial também representam fenômenos importantes no escoamento (HELLER, 2011; TERRIER, 2016). Os parâmetros adimensionais que representam as forças viscosas e de tensão superficial são, respectivamente, os números de Reynolds ( $Re$ , Equação 3.46) e de Weber ( $We$ , Equação 3.47).

$$Fr = \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos gravitacionais}} = \frac{V}{\sqrt{gL_{ref}}} \quad \text{Equação 3.45}$$

$$Re = \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos viscosos}} = \frac{V L_{ref}}{\nu_w} \quad \text{Equação 3.46}$$

$$We = \frac{\text{efeitos inerciais}}{\text{efeitos de tensão superficial}} = \frac{V}{(\sigma_{wa}/(\rho_w L_{ref}))^{0,5}} \quad \text{Equação 3.47}$$

onde

$V$  é a velocidade média do escoamento [m/s];

$L_{ref}$  é o comprimento de referência [m];

$\nu_w$  é a viscosidade cinemática da água [m<sup>2</sup>/s];

$\sigma_{wa}$  é a tensão superficial entre a água e o ar [N/m].

Na Equação 3.45, Equação 3.46 e Equação 3.47,  $L_{ref}$  representa um comprimento característico do fenômeno analisado. Para calhas vertentes de geometria lisa ou em degraus, quando a aeração do escoamento é induzida por sistema aerador, é comum que  $L_{ref}$  seja a profundidade do escoamento na aproximação do defletor  $h_0$  ou o comprimento do jato  $L_j$ . Já no caso de vertedouros em degraus submetidos à aeração natural, para o cálculo de  $We$ , Boes e Hager (2003b) sugerem  $L_{ref} = h_d/\text{sen } \alpha$ , isto é,  $L_{ref}$  igual à distância entre duas arestas (ou quinas) de degraus adjacentes. Ainda com relação ao escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração natural, costuma-se estabelecer os valores de  $Fr$  e  $We$  no ponto de início de aeração (isto é,  $Fr_i$  e  $We_i$ ).

Selecionado o modelo de semelhança de  $Fr$  em escoamentos sobre vertedouros, os efeitos de escala proporcionados pela não semelhança de  $Re$  e  $We$  devem ser passíveis de ser desprezados. Em modelos reduzidos que atendem à semelhança de  $Fr$ , a força de tensão superficial,

representada por  $We$ , é superestimada (CHANSON, 2009; PFISTER E HAGER, 2010a). Portanto, a superestimativa da tensão superficial no modelo subestima o transporte de ar, se comparado ao protótipo. Para minimizar esse efeito, devem ser respeitados valores limites para  $Re$  e  $We$  (PFISTER e CHANSON, 2014).

Com base em estudos em modelo reduzido de vertedouro em degraus submetido à aeração natural, Boes e Hager (2003b) sugerem que os efeitos de escala serão minimizados se forem respeitados os limites mínimos de  $Re \approx 10^5$  e  $We_i \approx 100$ . Já Takahashi et al. (2005) e Takahashi e Ohtsu (2012) sugerem  $Re > 3 \times 10^4$  a  $4 \times 10^4$ . No que diz respeito à análise das pressões médias e da flutuação de pressões sobre os degraus, Amador (2005) não detectou efeitos de escala quando  $Re > 10^5$ , estando, desse modo, em conformidade com as indicações de Boes e Hager (2003b).

Embora os autores mencionados no parágrafo anterior tenham considerado estrutura em degraus, grande parte dos trabalhos referência nesse âmbito ainda diz respeito a estudos envolvendo calhas lisas. Pfister e Hager (2010a) realizaram extensa pesquisa sobre recomendações da bibliografia para valores mínimos de  $Re$  e  $We$ , expostas na Tabela 3.10. Tais limites dizem respeito a modelos que simulam sistemas aeradores e escoamentos compostos por mistura de ar e água, utilizando como  $L_{ref}$  tanto  $h_0$  quanto  $L_j$ . Respeitando os limites apresentados na Tabela 3.10, os efeitos de viscosidade e tensão superficial serão minimizados, tornando-se irrelevantes se comparados ao efeito gravitacional, expresso por  $Fr$ .

Tabela 3.10 – Recomendações para  $Re$  e  $We$  em modelos de sistemas aeradores e escoamentos bifásicos. Adaptado de Pfister e Hager (2010a).

$L_{ref} = h_0$	$Re > 1 \times 10^5$ a $Re > 2,2 \times 10^5$
	$We_0 > 110$ a $We_0 > 170$
$L_{ref} = L_j$	$Re_j > 3,5 \times 10^6$
	$We_j > 500$

Adicionalmente, Pfister e Chanson (2014) recomendam que, para reduzirem-se os efeitos de escala na avaliação da aeração no escoamento, em situações em que  $5 < Fr_i < 15$ , deve-se respeitar  $Re > 2 \times 10^5$  a  $3 \times 10^5$  ou  $We_i > 140$ . Os autores ainda indicam que limites mais restritivos em termos de  $Re$  devem ser adotados nos casos de escoamento com menores valores de  $Fr_i$ .

Para o caso de modelos com o intuito de simular as características de sistemas aeradores, é recomendável que a escala seja grande o suficiente, de modo a reproduzir satisfatoriamente o mecanismo de arraste de ar (EEUFMG, 1989). Modelos considerados “grandes” e capazes de atenuar os efeitos de escala na modelação de sistemas aeradores são aqueles construídos em escalas geométricas da ordem de 1:10 e 1:15 (PINTO et al., 1982; EEUFMG, 1989). Volkart e Rutschmann (1984) indicaram que modelos não inferiores à escala de 1:25 podem ser utilizados para avaliar o comprimento do jato  $L_j$  e os parâmetros de entrada de ar no sistema aerador.

Finalmente, Boes e Hager (2003b) sugerem a adoção de escalas não inferiores a 1:15, quando considerado modelo físico de calha em degraus (que represente um protótipo cuja altura de degraus é igual a 0,60 m) submetido à escoamento com aeração natural.

Quando não é possível construir modelos em escala suficientemente grande, há meios para contornar esse problema. Como exemplo tem-se o trabalho de Zagustin et al. (1982), que desenvolveram estudos de sistemas aeradores em protótipo e em modelo reduzido na escala 1:50, instalados em um vertedouro de calha lisa, com declividades da ordem de  $9^\circ$  e  $17^\circ$ . Os autores identificaram que  $L_j$  no modelo resultou, inicialmente, cerca de 20% maior do que no protótipo. Uma vez que  $L_j$  influencia diretamente no coeficiente  $\beta$  (conforme já apresentado e discutido no item 3.4.1, p. 61), o resultado do modelo foi desfavorável à segurança, dado que superestimou o valor com relação ao protótipo. Então, os autores implementaram, no modelo reduzido, a chamada “bomba de vácuo”, isto é, um sistema capaz de controlar a pressão na porção inferior do jato, ilustrado na Figura 3.28. Com isso, os autores foram capazes de reproduzir  $L_j$  do protótipo no modelo e, desse modo, estimar corretamente a entrada de ar proporcionada pelo sistema aerador, mesmo em um modelo reduzido de escala pequena (1:50).

Assim, concluem-se os itens de revisão da literatura associada ao tema deste trabalho. Com isso, foi possível identificar algumas lacunas atuais do conhecimento, com as quais este trabalho procura contribuir, tema de que trata o tópico seguinte.

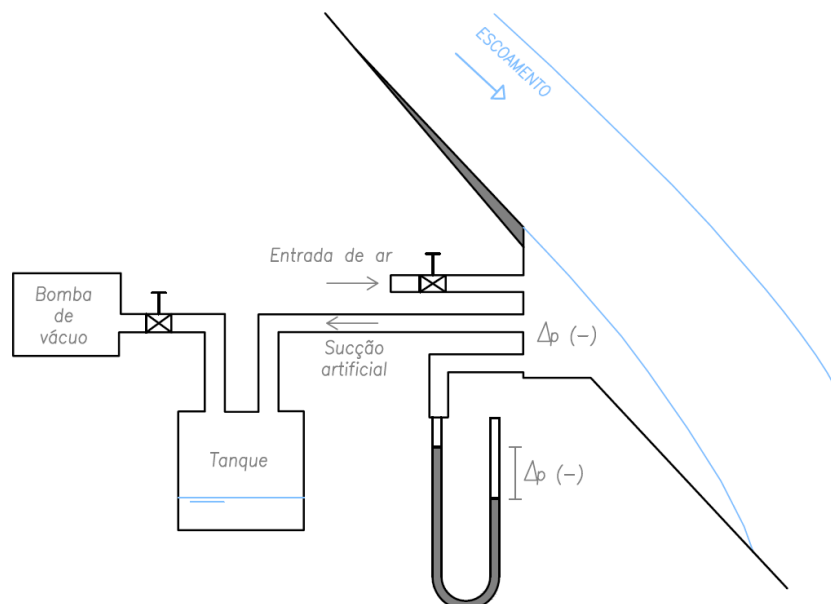


Figura 3.28 – Sistema para controle da pressão sob o jato no modelo reduzido. Representação esquemática em vista lateral. Adaptado de Zagustin et al. (1982).

### 3.6 LACUNAS DO CONHECIMENTO

Matos e Meireles (2014) indicaram que o período próximo à década de 2020 testemunharia avanços significativos na hidráulica de vertedouros em degraus combinados com elementos aeradores. De fato, os trabalhos de Pfister et al. (2006a, b), Zamora et al. (2008), Terrier (2016), entre outros,

apresentam informações importantes, antes desconhecidas, acerca do funcionamento de sistemas aeradores em vertedouros em degraus, especialmente no que diz respeito à avaliação da concentração de ar no escoamento. Por sua vez, as contribuições de Priebe (2020), Novakoski (2021), entre outros, também relativas à condição de aeração induzida, estão associadas à quantificação da pressão hidrodinâmica do escoamento sobre a estrutura.

As conclusões de Peterka (1953), bem como os dados experimentais de Dong e Su (2006), sugerem que a aeração está associada ao aumento das pressões (em termos médios) no escoamento. Contudo, não foi observado por autores que avaliaram o comportamento das pressões associado à aeração induzida em vertedouros em degraus, como Marques et al. (2019) e Novakoski (2021). Priebe (2020) identificou diferenças importantes nas pressões hidrodinâmicas extremas do escoamento associado à aeração induzida, em comparação com a aeração natural, por outro lado, os dados obtidos por Novakoski (2021) sugeriram variação pouco significativa.

O comportamento de sistemas aeradores compostos por defletor em conjunto com câmara de ar foi avaliado, em termos de concentração de ar, por Terrier (2016), e, em termos de pressão exercida pelo escoamento sobre a estrutura, por Novakoski (2021). A estrutura avaliada por Novakoski (2021) estava instalada imediatamente a jusante da ogiva do vertedouro (no primeiro degrau da calha), enquanto a instalação experimental adotada por Terrier (2016) permitia a instalação do aerador em diferentes regiões do vertedouro, porém, sempre considerando a existência de calha lisa a montante do sistema.

Pelo exposto, as atuais lacunas do conhecimento com as quais esta Tese procura contribuir dizem respeito a

- i. analisar o comportamento das pressões sobre os degraus de um vertedouro, considerando calha em degraus com a existência de sistema aerador;
- ii. verificar a influência de diferentes posicionamentos de sistema aerador nas pressões exercidas pelo escoamento sobre os degraus e
- iii. relacionar as pressões sobre os degraus com a concentração de ar no escoamento.



## 4 METODOLOGIA

A metodologia da Tese está subdividida em três itens principais, sendo o primeiro destinado à descrição da instalação experimental e os outros dois subdivididos de acordo com parte dos objetivos específicos propostos, desse modo:

- i. Item 4.1: descreve a instalação experimental utilizada, as configurações de ensaio propostas, as vazões do escoamento consideradas e parte da metodologia de análise de resultados;
- ii. Item 4.2: trata da metodologia adotada na identificação de pontos característicos do escoamento sobre o vertedouro, através de análise visual do fenômeno;
- iii. Item 4.3: diz respeito aos ensaios de medição do coeficiente de entrada de ar ( $\beta$ ) pelo sistema aerador e de medição das pressões hidrodinâmicas na superfície dos degraus.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO GERAL

#### 4.1.1 Instalação experimental

Para realização dos ensaios, utilizou-se instalação experimental (modelo físico) existente no Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS. O modelo é constituído por material metálico, com exceção das paredes laterais da calha, construídas em acrílico. O vertedouro possui 0,50 m de largura, cerca de 4 m de comprimento (no sentido longitudinal da calha) e 60 degraus (sendo possível instalar instrumentação até o degrau nº52). As dimensões das faces vertical e horizontal de cada degrau são de 0,06 m e 0,045 m, respectivamente (resultando em uma declividade de calha igual a 1,00V:0,75H,  $\alpha = 53,13^\circ$ ). A montante do canal em degraus existe uma ogiva de perfil padrão *Waterways Experiment Station* (WES), desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers, operada livremente (sem comportas). Não há degraus de transição entre a ogiva e a calha em degraus. As características descritas estão ilustradas na Figura 4.1 e indicadas na Tabela 4.1. Quanto à numeração dos degraus, a face vertical subsequente à ogiva não tem numeração. As próximas faces horizontal e vertical dizem respeito ao degrau nº1, e assim sucessivamente, até a extremidade inferior do canal (ver Figura 4.1). A Figura 4.2 apresenta uma fotografia da instalação descrita.

A água é direcionada a partir de um reservatório inferior do laboratório (com capacidade de 600 m<sup>3</sup>) até o reservatório superior do modelo, por meio de tubulações de aço (diâmetro nominal de 300 mm), e pode ser aduzida por três conjuntos motobomba distintos (*KSB 250-29, 1760 rpm e 75 cv; KSB 150-33, 1140 rpm e 25 cv; Weg, 1750 rpm e 50 cv*), dispostos em paralelo. O ajuste de vazão é feito por meio de inversores de frequência (*Weg CFW 700, Weg CFW 09, Weg CFW 05*) e a medição de vazão é feita por meio de medidores eletromagnéticos (*Incontrol CEV 1000, Siemens MAG 6000, Emerson 09-FM-D119*). Após ser direcionada para o reservatório superior do modelo, a água escoá pelo canal em degraus e retorna ao reservatório inferior de origem.

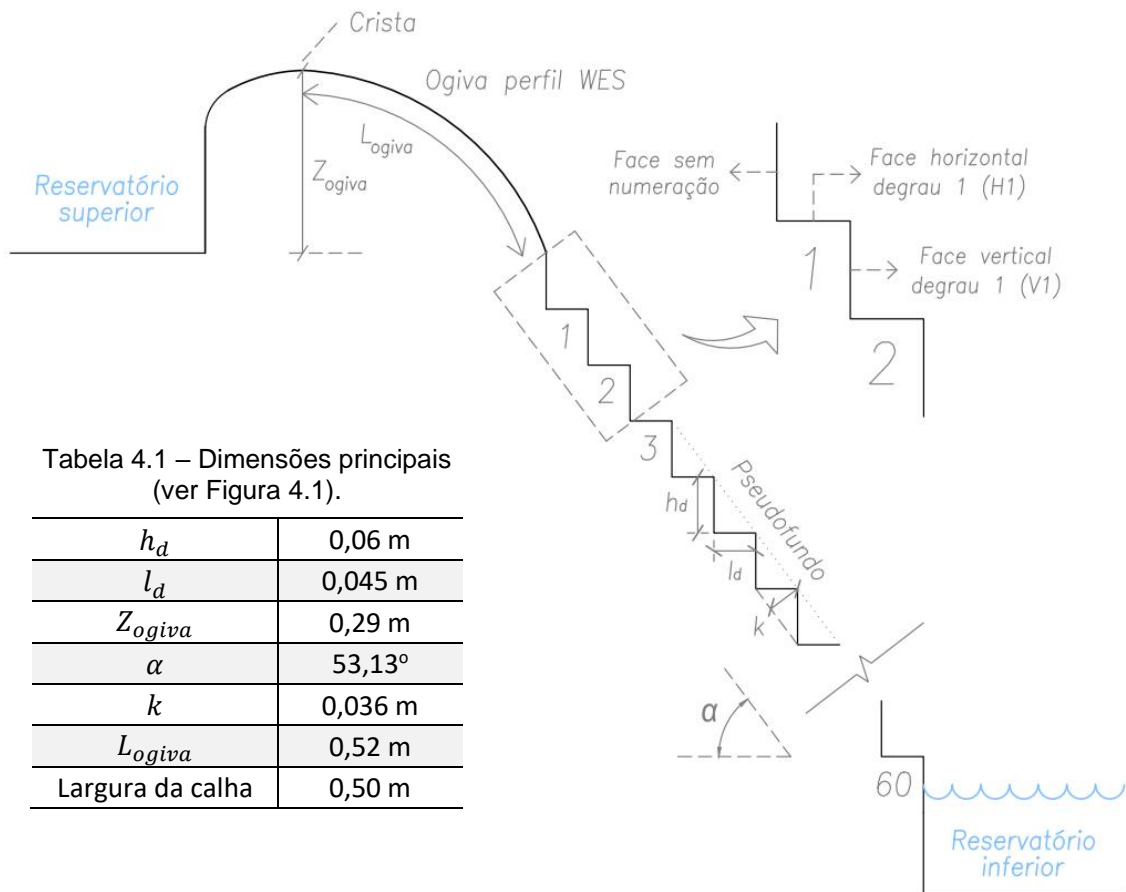


Figura 4.1 – Representação esquemática, em vista lateral, do modelo utilizado e detalhe de numeração dos degraus (sem escala).



Figura 4.2 – Fotografia da instalação experimental utilizada.

#### 4.1.2 Configurações de ensaio

Previamente à definição da metodologia a ser adotada na presente pesquisa, realizaram-se testes com o intuito de verificar a relação existente entre a aeração induzida e as pressões hidrodinâmicas exercidas pelo escoamento, nas faces verticais e horizontais dos degraus, considerando diferentes coeficientes de entrada de ar ( $\beta$ ). Para tal, utilizou-se um instrumento mecânico (soprador de ar) conectado ao sistema aerador. Tal instrumento é capaz de inserir, de forma mecânica, vazões pré-estabelecidas de ar no escoamento. Mais detalhes quanto à metodologia e aos resultados obtidos nos testes com o soprador de ar estão expostos no APÊNDICE A.

Em resumo, os testes realizados sugeriram que, de modo geral, considerando os diferentes coeficientes  $\beta$  ensaiados, não houve alteração generalizada e significativa nos valores de pressão sobre os degraus da calha, mesmo nos casos de coeficientes  $\beta$  iguais a 10%. Porém, variações consideráveis ocorreram nos casos dos parâmetros estatísticos extremos (em especial, no parâmetro  $P_{0,1\%}$ ), indicando que maiores valores do coeficiente  $\beta$  podem contribuir diretamente na redução da chance de ocorrência de cavitação e consequente dano na estrutura (uma vez que se observou aumento das pressões extremas  $P_{0,1\%}$  com o aumento do coeficiente  $\beta$ ).

Tais resultados orientaram a definição dos objetivos e metodologia da presente pesquisa: a instalação do sistema aerador em posições mais a jusante na calha tende a resultar em coeficiente  $\beta$  superior (devido aos maiores valores do número de Froude do escoamento  $Fr_0$ ), se comparado ao sistema posicionado no início do canal em degraus.

Desse modo, para desenvolvimento da pesquisa, foram utilizadas três configurações de ensaio distintas, conforme descrito na sequência e ilustrado na Figura 4.3.

- i. Aeração natural (NAT) - Figura 4.3a: diz respeito à configuração sem a presença de elementos aeradores no vertedouro. Nesse caso, a aeração inicia com o desenvolvimento pleno (em profundidade) da camada limite turbulenta no escoamento;
- ii. Aeração induzida com sistema aerador no degrau nº1 ( $D_1$ ) - Figura 4.3b: diz respeito à configuração com a presença de defletor ( $t = 10 \text{ mm}$ ,  $\theta = 7,6^\circ$  e largura de 0,50 m), juntamente com câmara de ar (cujas dimensões estão indicadas na Figura 4.4), instalados no primeiro degrau da calha. O defletor é apoiado sobre a face horizontal do degrau nº1 ( $H_1$ ), ao passo que a face vertical do mesmo degrau ( $V_1$ ) é retirada para possibilitar a conexão com a câmara de ar. O ar é direcionado até a câmara por meio de uma tubulação circular (diâmetro interno de 69 mm) com 0,70 m de comprimento (cerca de 10 vezes a medida do diâmetro interno). Nesse caso, além da aeração superior do escoamento (proveniente da superfície livre), o ar também é inserido pela parcela inferior do jato do escoamento, imediatamente a jusante do defletor. Deve-se destacar que a entrada de ar pelo sistema aerador mencionado ocorre de forma natural, sem indução

mecânica, sendo proporcionada pela própria sucção do escoamento de água sobre o defletor.

- iii. Aeração induzida com sistema aerador no degrau nº10 ( $D_{10}$ ) - Figura 4.3c: situação semelhante à condição  $D_1$ , porém com sistema aerador posicionado no degrau nº10. Vale lembrar que, como no caso da condição  $D_1$ , a entrada de ar pelo sistema aerador é proporcionada também pela própria sucção natural do escoamento (não há indução mecânica de ar).

Importante ressaltar que diversos trabalhos já publicados (e mencionados no Capítulo 3) realizaram ensaios semelhantes no mesmo modelo físico do presente trabalho, podendo-se destacar, dentre outros:

- i. Canellas (2020) e Matos et al. (2022): avaliação de resultados associados à aeração natural do escoamento;
- ii. Novakoski et al. (2020), Ferla et al. (2021), Novakoski (2021): avaliação da aeração induzida no escoamento (condições  $D_1$  e  $D_{10}$ ), principalmente.

Assim, os dados das condições NAT e  $D_1$  considerados neste trabalho são os mesmos já explorados por Canellas (2020), Novakoski (2021) e Matos et al. (2022).

O APÊNDICE B apresenta uma discussão acerca do posicionamento do sistema aerador na calha em degraus, com base no cálculo do índice de cavitação ( $\sigma$ ) e na comparação com os índices críticos ( $\sigma_c$ ), segundo dois critérios. Os resultados indicaram que tanto a condição  $D_1$  quanto a condição  $D_{10}$  podem ser alternativas viáveis no contexto prático, dependendo do critério adotado. A condição em que o sistema aerador está posicionado no primeiro degrau da calha ( $D_1$ ) pode ser utilizada em barragens de altura reduzida, ao passo que, em barragens mais altas, pode-se adotar a condição que considera a instalação de sistema aerador mais a jusante (caso compatível à condição aqui denominada  $D_{10}$ )<sup>53</sup>.

Vale destacar que, embora tenha se fixado o degrau nº10 na condição de aeração induzida com sistema aerador posicionado mais a jusante na calha (condição aqui denominada  $D_{10}$ ), isso não significa que, em um caso real, tal dispositivo deva ser instalado necessariamente nessa posição. Mais detalhes e discussões relacionados a esse ponto serão introduzidos ao longo do Capítulo 5.

---

<sup>53</sup>A indicação de uma ordem de grandeza associada a barragens “de altura reduzida” ou então “mais altas” pode ser relativa. Essa característica tem relação não apenas com a altura do barramento em si, mas também com o sistema aerador empregado e com a vazão do escoamento sobre o vertedouro. Isso porque a combinação entre tais parâmetros pode fazer com que, por exemplo, o jato formado a jusante do aerador seja tal a ponto de inviabilizar a colocação do sistema aerador em porções a jusante ao longo da calha, ainda que a barragem seja considerada “alta” – isto é, a extensão do jato formado pode ser tal que não haja mais escoamento em contato com os degraus, a jusante do impacto. Ou seja, no texto, os termos associados a barragens “de altura reduzida” ou “mais altas” devem ser interpretados dessa maneira, como relativos a cada caso avaliado, não sendo seguro ou coerente apontar uma ordem de grandeza para esses termos, a ponto de generalizá-los.

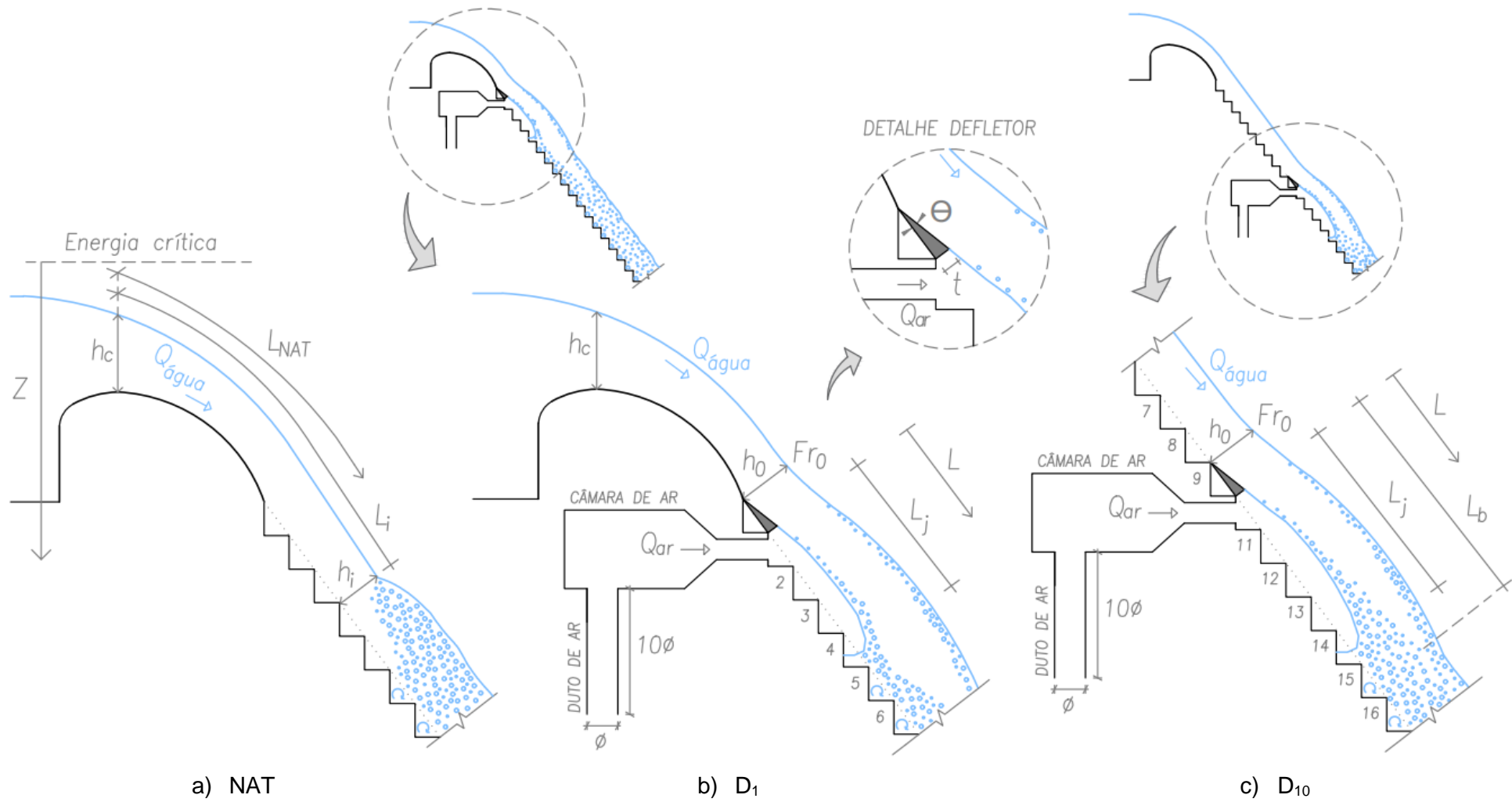


Figura 4.3 – Esquemas, em vista lateral, das configurações de ensaio utilizadas, sendo elas a) aeração natural (NAT), b) aeração induzida com sistema aerador no degrau nº1 ( $D_1$ ) e c) aeração induzida com sistema aerador no degrau nº10 ( $D_{10}$ ).

Na Figura 4.4 tem-se a representação esquemática da câmara de ar, com indicação das dimensões aproximadas da peça. Vale destacar que o plano por onde ocorre a saída de ar coincide com a face vertical do degrau imediatamente a jusante do defletor (face esta que é retirada, para permitir o acesso do ar, como representado na Figura 4.3).

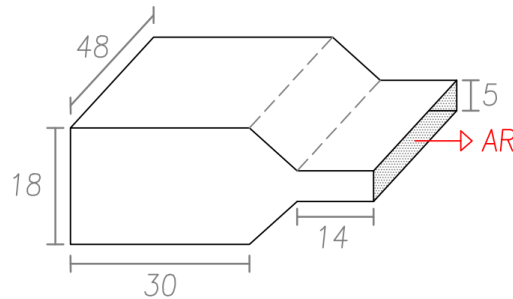


Figura 4.4 – Dimensões aproximadas da câmara de ar, em cm.

#### 4.1.3 Vazões ensaiadas

Foram consideradas faixas de vazões do escoamento distintas, a depender da condição ensaiada (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ) e da análise realizada. As vazões específicas  $q$  (vazão por metro de largura), ensaiadas em modelo, constam na Tabela 4.2, estando também descritas a seguir:

- i. Na análise visual do escoamento, considerou-se a faixa de vazões específicas  $0,054 \leq q \text{ (m}^2/\text{s)} \leq 0,50$  (em modelo), nas condições NAT e  $D_1$ , ao passo que, na condição  $D_{10}$ , o intervalo avaliado foi de  $0,2 \leq q \text{ (m}^2/\text{s)} \leq 0,5$ . Na condição  $D_{10}$  não foram avaliados casos em que  $q < 0,2 \text{ m}^2/\text{s}$  uma vez que, nesses casos, o início da aeração natural no escoamento ocorre a montante do degrau n<sup>o</sup>10<sup>54</sup>;
- ii. Na avaliação do coeficiente de entrada de ar  $\beta$ , na condição  $D_1$  avaliou-se  $0,054 \leq q \text{ (m}^2/\text{s)} \leq 0,50$  e, na condição  $D_{10}$ , pelos mesmos motivos mencionados anteriormente, tem-se  $0,2 \leq q \text{ (m}^2/\text{s)} \leq 0,5$ . Nesse caso, não se considera a condição NAT (uma vez que não há sistema aerador, tampouco coeficiente  $\beta$ , nessa condição);
- iii. A análise das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus contemplou as maiores vazões, isto é, a faixa de  $0,2 \leq q \text{ (m}^2/\text{s)} \leq 0,5$ , para todas as condições (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ).

Mais detalhes quanto às análises desenvolvidas (isto é, de análise visual do escoamento, do coeficiente  $\beta$  e das pressões hidrodinâmicas) são mencionados posteriormente.

<sup>54</sup> Vale destacar que, na prática, poderão haver situações em que a aeração natural no escoamento ocorrerá a montante do aerador. Contudo, sob o ponto de vista de proteção da calha contra os danos da cavitação, tais casos são menos preocupantes, sendo assim, não foram levados em conta aqui.

Tabela 4.2 – Vazões do escoamento consideradas (em modelo).

$q$ ( $m^2/s$ )	Análise visual do escoamento			Análise do coeficiente $\beta$		Análise das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus		
	NAT	D <sub>1</sub>	D <sub>10</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>10</sub>	NAT	D <sub>1</sub>	D <sub>10</sub>
0,054	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
0,082	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
0,108	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
0,150	✓	✓	✗	✓	✗	✗	✗	✗
0,200	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0,300	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0,400	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
0,500	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

LEGENDA	✓	Considerado
	✗	Não considerado

#### 4.1.4 Parâmetros adimensionais – $Fr$ , $Re$ e $We$

Os números de Froude ( $Fr$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Weber ( $We$ ) foram calculados de acordo com a Equação 3.45, Equação 3.46 e Equação 3.47, respectivamente (apresentadas no item 3.5), para todas as vazões ensaiadas em cada condição (NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>).

Para cálculo do número de Froude do escoamento na aeração induzida, utilizou-se como comprimento característico (ou de referência,  $L_{ref}$ ) o parâmetro  $h_0$ , a exemplo de grande parte dos trabalhos semelhantes, mencionados no Capítulo 3.

Já no caso dos números de Reynolds e Weber, utilizou-se como  $L_{ref}$  tanto a profundidade  $h_0$  quanto o comprimento do jato  $L_j$ , tendo sido este definido experimentalmente, por meio da análise visual do escoamento. Com relação ao parâmetro  $h_0$ , realizou-se análise comparativa entre os valores medidos experimentalmente (através de ponta linimétrica) e os valores estimados. No caso da condição D<sub>1</sub>, a profundidade  $h_0$  estimada foi baseada na igualdade das energias do escoamento entre as seções crítica e inicial da calha em degraus, desconsiderando-se a perda de carga no trecho. Já na condição D<sub>10</sub>, a profundidade  $h_0$  estimada baseou-se na proposta de Meireles et al. (2012), tendo como base a Equação 4.1. Nesse caso, para estimativa da profundidade do escoamento no início da aeração  $h_i$  e do comprimento de início de aeração  $L_i$ , considerou-se, respectivamente, a Equação 4.2 e Equação 4.3, também apresentadas por Meireles et al. (2012). A adoção dos ajustes propostos por Meireles et al. (2012) se justifica em razão do grande número de casos considerados pelos referidos autores, quando da proposta das equações, e também pela relativa semelhança com os valores medidos no modelo utilizado neste trabalho.

$$\frac{h_0}{h_i} = 1,17 - 0,25 \frac{L_0}{L_i} + \frac{0,084}{L_0/L_i} \quad \text{Equação 4.1}$$

$$\frac{h_i}{k} = 0,35 F_k^{0,59} \quad \text{Equação 4.2}$$

$$\frac{L_i}{k} = 6,75 F_k^{0,76} \quad \text{Equação 4.3}$$

onde

$L_0$  é o comprimento, a contar da crista do vertedouro, até a posição do defletor [m].

Nos escoamentos submetidos à aeração induzida, consideraram-se os efeitos inerciais do escoamento na entrada do defletor, representados pela velocidade média ( $V_0$ ), de acordo com a Equação 4.4.

$$V_0 = \frac{q}{h_0} \quad \text{Equação 4.4}$$

No caso do escoamento submetido à aeração natural,  $Fr$ ,  $Re$  e  $We$  foram calculados considerando o ponto de início de aeração natural dado por Meireles et al. (2012), conforme Equação 4.2.

Tanto a instalação experimental quanto as configurações de ensaio descritas neste item são comuns aos itens subsequentes, que dizem respeito à identificação dos pontos característicos do escoamento (item 4.2) e aos ensaios de medição de pressão e do coeficiente  $\beta$  (item 4.3). No item 4.3 foi dada ênfase à instrumentação utilizada em cada um dos ensaios, bem como às particularidades das condições ensaiadas e da análise de dados.

## 4.2 REGIÕES E PONTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO

A identificação de regiões e dos principais pontos característicos no escoamento foi realizada por meio de análise visual do fenômeno, observado em cada uma das configurações analisadas, conforme descrito na sequência. Vale destacar que, em razão da própria característica intermitente da aeração do escoamento, os pontos que delimitam a ocorrência de tais regiões não são fixos ao longo da calha. Desse modo, foram identificados e definidos com base na análise visual do comportamento médio do escoamento, tanto durante os ensaios quanto posteriormente, com auxílio de registros em vídeo e fotografia.

### 4.2.1 Aeração natural (NAT)

Na condição de aeração natural (NAT), os pontos característicos identificados são (ver Figura 4.5):

- i. Início de aeração incipiente (Figura 4.5b): trata-se da região onde, com o afloramento da camada limite turbulenta até a superfície, inicia-se a aeração natural no escoamento. Visualmente, identifica-se o escoamento aerado quando são observadas regiões de “água branca” ou “água clara” (regiões em que o escoamento adquire aspecto esbranquiçado). Vale ressaltar que, em razão da largura do modelo físico ser



relativamente pequena (0,50 m), as paredes laterais do modelo favorecem o surgimento de zonas aeradas antes mesmo do afloramento da camada limite turbulenta na superfície, podendo sugerir, dessa forma, um “falso” ponto de início de aeração incipiente (ver Figura 4.5a). Sendo assim, definiu-se a região de início de aeração incipiente quando da identificação da aeração desenvolvida em toda a largura da calha, e não apenas nas proximidades das paredes laterais. Esses detalhes estão ilustrados na Figura 4.5a e Figura 4.5b;

- ii. Início de aeração total (Figura 4.5c): compreende a região em que escoamento está visivelmente aerado não apenas ao longo de toda a largura do vertedouro, como também em toda a profundidade.

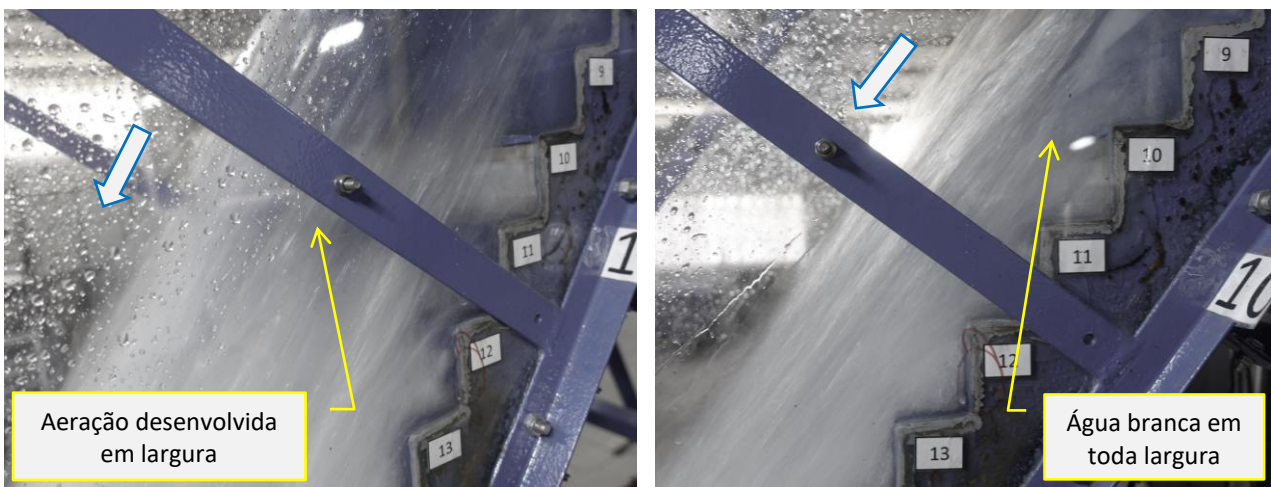
#### 4.2.2 Aeração induzida ( $D_1$ e $D_{10}$ )

Nas condições de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ), os pontos característicos são (ver Figura 4.6):

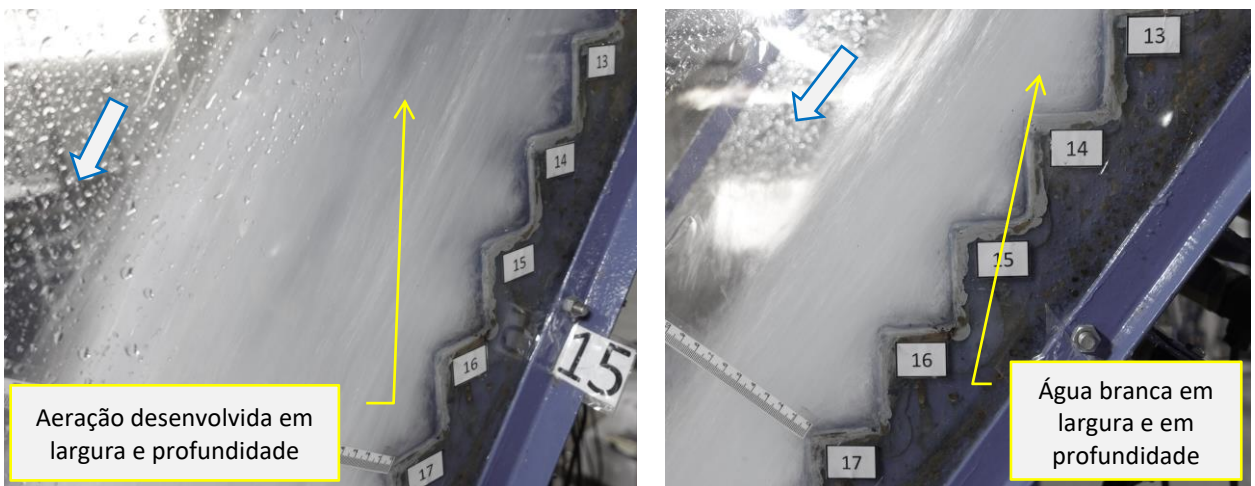
- i. Impacto do jato sobre os degraus (Figura 4.6a): ponto caracterizado pela incidência do jato do escoamento sobre os degraus da calha. A partir de então inicia a aeração inferior do escoamento (nas proximidades da calha em degraus, abaixo da *blackwater*);
- ii. Final da *blackwater* (Figura 4.6b): como já definido por Pfister et al. (2006a) – Figura 3.19, entre outros, a *blackwater* é caracterizada pela zona em que o escoamento de água está confinado entre porções de mistura ar-água. Sendo assim, uma das regiões características do escoamento com aeração induzida foi marcada pelo ponto final da *blackwater*.



a) Efeitos de parede ("falso" início de aeração)

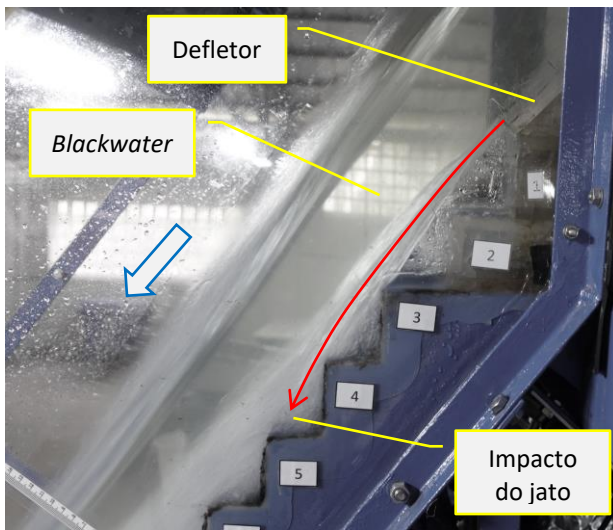


b) Início de aeração incipiente

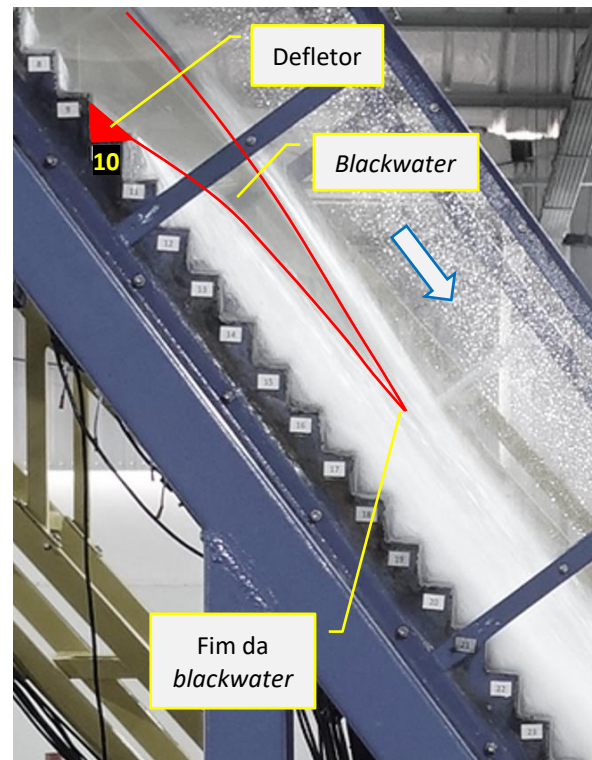


c) Início de aeração total

Figura 4.5 – Registros, em vista diagonal e lateral, ilustrando aspectos do escoamento associados à condição NAT ( $q = 0,15 \text{ m}^2/\text{s}$ ).



a) Ponto de impacto do jato nos degraus. Registro da condição  $D_1$ ,  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ .



b) Região de *blackwater* após o defletor. Registro da condição  $D_{10}$ ,  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Figura 4.6 – Registros fotográficos, em vista lateral, ilustrando aspectos do escoamento associados às condições de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ).

### 4.3 ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO E DO COEFICIENTE $\beta$

A descrição da metodologia dos ensaios deste item diz respeito às três configurações já caracterizadas no item 4.1.2 (Figura 4.3), sendo elas:

- i. Aeração natural (NAT);
- ii. Aeração induzida com sistema aerador no degrau nº1 ( $D_1$ );
- iii. Aeração induzida com sistema aerador no degrau nº10 ( $D_{10}$ ).

Como já mencionado, os dados utilizados no presente trabalho são parte dos mesmos utilizados por Canellas (2020), Novakoski (2021), Matos et al. (2022), dentre outros. Neste texto, porém, optou-se por descrevê-los novamente em virtude das peculiaridades de cada trabalho, estando a exposição aqui apresentada de forma distinta da utilizada pelos autores mencionados.

#### 4.3.1 Medição do coeficiente $\beta$

O coeficiente de entrada de ar ( $\beta$ ) é definido de acordo com a Equação 3.20, e foi medido nas configurações  $D_1$  e  $D_{10}$ .

A vazão de água ( $Q_{\text{água}}$ ) é obtida diretamente pela leitura dos medidores de vazão instalados nas tubulações que alimentam o reservatório superior do modelo, conforme descrito no item 4.1. Já a estimativa da vazão de ar ( $Q_{\text{ar}}$ ) foi feita indiretamente, por meio da medição da velocidade de

entrada de ar na tubulação a montante da câmara, multiplicando-se este valor pela área da seção transversal da tubulação. Para isso, utilizou-se uma sonda Pitot-Prandtl (*Dwyer 166-12*, diâmetro 1/8”) acoplada a um transmissor diferencial de pressão, cujas especificações estão indicadas na Tabela 4.3. O transmissor mede a diferença entre as pressões estática ( $P_e$ ) e de estagnação ( $P_{estag}$ ) atuantes na sonda Pitot-Prandtl, e informa essa diferença por meio de um sinal em corrente elétrica. A transformação de sinal elétrico para pressão é feita por meio de uma curva de calibração, que relaciona as faixas de medição do transmissor diferencial de corrente elétrica e de pressão. Então, a velocidade do escoamento é determinada por meio da relação de Bernoulli, resultando na expressão indicada na Equação 4.5.

$$V = \left[ \frac{2 (P_{estag} - P_e)}{\rho_{ar}} \right]^{1/2} \quad \text{Equação 4.5}$$

onde

$P_e$  é a pressão estática [Pa];

$P_{estag}$  é a pressão de estagnação [Pa];

$\rho_{ar}$  e a massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>].

A sonda Pitot-Prandtl foi posicionada no eixo da tubulação de entrada de ar, 0,21 m a montante da câmara de ar (isto é, cerca de 3 vezes o diâmetro  $\varnothing$  do tubo), conforme esquema da Figura 4.7. Previamente à definição da posição central da tubulação – tida como referência à medição da velocidade do ar – realizou-se o levantamento do perfil de velocidades do escoamento de ar no interior do tubo de adução. Tal procedimento indicou um perfil de velocidades com comportamento praticamente uniforme ao longo do diâmetro do tubo, o que conduziu e fundamentou a adoção da posição central da tubulação como ponto de referência. Mais detalhes relacionados à medição do perfil de velocidades do ar no interior do tubo de adução constam no APÊNDICE C.

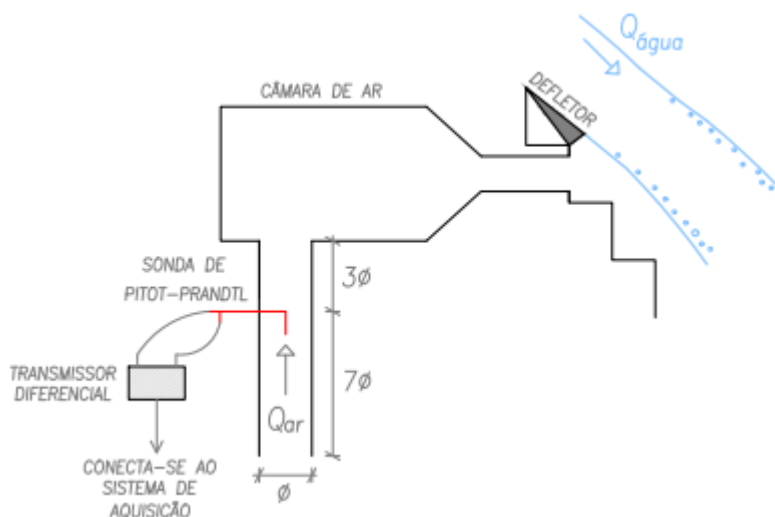


Figura 4.7 – Esquema, em seção transversal, do local de instalação da sonda de Pitot-Prandtl.

Tabela 4.3 – Especificações do transmissor diferencial de pressão.

Fabricante	Rücken
Modelo	RTBP-420-DIF
Faixa de medição (pressão)	0 a 10 mmCA
Exatidão	0,5 a 1% da faixa

O sinal de saída do transmissor diferencial foi convertido e interpretado por uma placa de conversão (*National Instruments NI DAQ-9178, módulo NI 9215*) e adquirido através do *software* LabView

(*National Instruments Signal Express 4.0.0*). O tempo e a frequência de aquisição de dados no instrumento foram iguais a, respectivamente, 10 minutos e 100 Hz, totalizando 60.000 dados por ensaio. Para definição da velocidade ( $V$ ), considerou-se a média dos valores adquiridos com o transmissor diferencial de pressão, ao longo dos 10 minutos de ensaio.

Na análise do coeficiente  $\beta$ , como apresentado anteriormente (na Tabela 4.2), na condição  $D_1$  a faixa de vazões específicas contemplada foi igual a  $0,054 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , ao passo que na condição  $D_{10}$  considerou-se  $0,2 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Na análise de resultados, o coeficiente  $\beta$  foi avaliado com relação ao número de Froude do escoamento e com a razão  $L_j/h_0$ , a exemplo de parte dos estudos mencionados no item 3.4.1. Além disso, comparou-se o coeficiente  $\beta$  medido com algumas das equações de previsão propostas por diferentes pesquisadores, apresentadas no item 3.4.1. Por fim, sugere-se, neste trabalho, uma nova equação de previsão do coeficiente  $\beta$ , com base, dentre outros, nos principais parâmetros adimensionais que influenciam o parâmetro, de acordo com a literatura.

De modo a avaliar se os resultados da pesquisa foram influenciados pela subpressão sob o jato ( $\Delta_p$ ), os valores de  $\beta$  medidos foram comparados com o critério indicado por Pfister (2011), critério este já mencionado no item 3.4.1 e rerepresentado na Equação 4.6.

$$\frac{\Delta_p}{h_0} \leq 0,10 \quad \text{Equação 4.6}$$

#### 4.3.2 Medição de pressão

A medição das pressões sobre as faces dos degraus foi realizada por meio de transdutores de pressão piezorresistivos. Previamente à realização dos ensaios, todos os instrumentos passaram por processo de calibração estática, isto é, analisou-se a resposta dos transdutores submetidos a pressões provenientes de colunas de água com alturas constantes, definindo-se uma curva de calibração para cada instrumento. As características dos transdutores utilizados, bem como a indicação dos degraus instrumentados em cada uma das configurações ( $NAT$ ,  $D_1$  e  $D_{10}$ ), estão expostas no APÊNDICE D.

Para todas as configurações, as tomadas de pressão foram posicionadas a 8 mm da aresta externa de cada degrau, conforme sugere a Figura 4.8, no eixo do canal (portanto, a 0,25 m de distância de cada uma das paredes laterais). Tendo em vista a impossibilidade física da instalação do transdutor faceado junto à estrutura do vertedouro, a conexão entre a tomada de pressão nos degraus e o instrumento foi feita por meio de tubulação flexível de nylon (diâmetro interno de 1,7 mm e externo de 3,2 mm), de aproximadamente 0,10 m a 0,15 m de comprimento cada. Os orifícios das tomadas de pressão nos degraus foram construídos com broca de 3,25 mm de diâmetro.

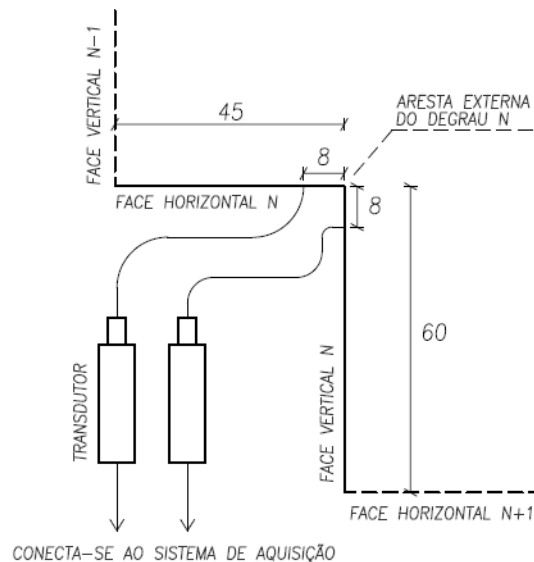


Figura 4.8 – Esquema em vista lateral, em uma seção transversal no eixo do canal, do local de instalação dos transdutores de pressão no degrau. Dimensões em mm.

Os transdutores identificam o esforço a que estão submetidos por meio da deformação de uma membrana elástica presente no interior do instrumento. A deformação da membrana é responsável por alterar a resistência elétrica de elementos inseridos no transdutor e, uma vez que este é alimentado por uma tensão constante, a mudança da resistência altera também a corrente elétrica presente no instrumento. Desse modo, o esforço a que o transdutor está submetido corresponde a um único sinal de corrente. O sinal de saída do transdutor foi interpretado por uma placa de conversão (*National Instruments NI DAQ-9178, módulo NI 9215*) e adquirido através do *software LabView (National Instruments Signal Express 4.0.0)*.

Em todos os ensaios de medição de pressão, o tempo e a frequência de aquisição de dados nos transdutores foram iguais a, respectivamente, 10 minutos e 100 Hz, totalizando 60.000 dados por ensaio por instrumento.

Os dados adquiridos pelos transdutores foram analisados no domínio do tempo. Os parâmetros estatísticos obtidos no tratamento dos dados experimentais foram

- i. pressões médias ( $P_{med}$ );
- ii. desvio padrão das pressões ( $P_{\sigma}$ ) e
- iii. pressões com probabilidades de não excedência de 0,1%; 1%; 5%; 95%; 99% e 99,9% ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$ ,  $P_{5\%}$ ,  $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ , respectivamente), também chamadas de indicadores de pressões extremas,

ao longo do comprimento do canal, para as faces vertical e horizontal dos degraus. Na etapa de avaliação geral dos parâmetros estatísticos associados às pressões hidrodinâmicas, foram verificados os parâmetros  $P_{med}$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$ , tanto na face vertical quanto horizontal dos degraus. Já na etapa de previsão da distribuição de pressões, foram propostas equações considerando os parâmetros  $P_{med}$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ , na face vertical do degrau, e os parâmetros

$P_{med}$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ , na face horizontal do degrau, em conformidade com as conclusões de autores como Sánchez-Juny et al. (2007, 2008), Amador et al. (2009), Matos et al. (2022), entre outros, apresentados no Capítulo 3.

Como apresentado na Tabela 4.2, as pressões hidrodinâmicas foram avaliadas nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , no intervalo  $0,2 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Além disso, a condição de aeração natural (NAT) também foi contemplada, no mesmo intervalo de vazão específica  $q$ , permitindo comparações entre os dados das diferentes condições.

Por fim, com o objetivo de estabelecer, ao longo da calha em degraus, as zonas críticas suscetíveis a danos por cavitação, realizou-se uma avaliação conjunta entre os dados de pressão (adquiridos nos ensaios) e os valores de concentração de ar no fundo do escoamento ( $C_b$ ). Nessa etapa, uma vez que não foram realizadas medições de concentração de ar nesse trabalho, foram considerados os modelos propostos por Matos (1999), Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), respectivamente, para previsão de  $C_b$  nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ .

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS SOBRE A INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL

Este trabalho considerou a coleta de dados em uma instalação experimental que não está associada, na prática, a algum protótipo, única e exclusivamente. Porém, os resultados obtidos podem ser transferidos para a escala de protótipo (e isso é feito, como mencionado oportunamente, ao longo dos resultados). Assim, para facilitar o entendimento e simplificar a nomenclatura “modelo *versus* protótipo”, a instalação experimental utilizada neste trabalho foi tratada, muitas vezes, como “modelo”, ou “modelo físico”, em vez de “instalação experimental”.

Quando mencionadas vazões específicas associadas a resultados em escala de protótipo, foi considerado o símbolo “ $q_p$ ”, alternativamente à simbologia de vazão específica “ $q$ ” (esta última, associada à escala de modelo).

## 5 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo da Tese, tanto no que diz respeito à coleta de dados na instalação experimental quanto à avaliação e proposta de equações de previsão de diferentes parâmetros. Inicialmente, no item 5.1, são avaliados os principais parâmetros adimensionais do escoamento, traduzidos pelos números de Froude, Reynolds e Weber. No item 5.2 expõe-se as regiões características do escoamento, tanto na condição de aeração natural quanto induzida, além de avaliar equações para previsão do comprimento do jato  $L_j$ , enquanto no item 5.3 avalia-se o coeficiente de entrada de ar  $\beta$ . Os itens 5.4 e 5.5 tratam das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus, com ênfase, respectivamente, na avaliação dos dados coletados e na proposta de modelo para previsão de pressões. Por fim, no item 5.6, tem-se a avaliação da concentração de ar no escoamento, tendo como base modelos de previsão já estabelecidos.

Ao longo deste capítulo, valem as definições indicadas na Figura 4.3. A Tabela 5.1 compila os principais parâmetros do escoamento nas condições de aeração natural (NAT) e induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ) – todos serão abordados em detalhe ao longo deste capítulo. Vale destacar, ainda, que os referidos parâmetros estão associados a modelo com altura de degraus  $h_d = 0,06\text{ m}$ , declividade de calha  $\alpha = 53,13^\circ$  e defletor com altura  $t = 0,01\text{ m}$  e ângulo  $\theta = 7,6^\circ$ .

Tabela 5.1 – Compilado dos parâmetros principais do escoamento nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ .

Condição	$q\text{ (m}^2/\text{s)}$	$h_c\text{ (m)}$	$h_i\text{ ou }h_0\text{ (m)}^{55}$	$Fr^{56}$	$L_i\text{ ou }L_j\text{ (m)}^{57}$	$\beta_{\text{medido}}$
NAT	0,054	0,067	0,023	4,94	0,15	-
	0,082	0,088	0,030	5,04	0,30	-
	0,108	0,106	0,035	5,27	0,45	-
	0,150	0,132	0,042	5,57	0,75	-
	0,200	0,160	0,050	5,71	0,83	-
	0,300	0,209	0,064	5,92	1,35	-
	0,400	0,254	0,076	6,10	1,73	-
	0,500	0,294	0,086	6,33	2,10	-
$D_1$	0,054	0,067	0,020	6,10	0,45	0,153
	0,082	0,088	0,029	5,31	0,45	0,117
	0,108	0,106	0,037	4,85	0,38	0,095
	0,150	0,132	0,050	4,28	0,38	0,058
	0,200	0,160	0,064	3,95	0,38	0,036
	0,300	0,209	0,091	3,49	0,38	0,024
	0,400	0,254	0,117	3,19	0,30	0,014
	0,500	0,294	0,140	3,05	0,30	0,013
$D_{10}$	0,200	0,160	0,053	5,23	0,30	0,085
	0,300	0,209	0,073	4,86	0,30	0,059
	0,400	0,254	0,091	4,66	0,30	0,043
	0,500	0,294	0,108	4,50	0,30	0,031

<sup>55</sup> Sendo  $h_i$  na condição NAT e  $h_0$  nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ .

<sup>56</sup> Relacionado à profundidade no início de aeração na condição NAT ( $h_i$ ) e no defletor nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  ( $h_0$ ).

<sup>57</sup> Sendo  $L_i$  na condição NAT e  $L_j$  nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ .



## 5.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS – $Fr$ , $Re$ , $We$

Como exposto no item 3.5, os parâmetros adimensionais característicos do escoamento de água à superfície livre com aeração são representados, principalmente, pelos números de Froude ( $Fr$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Weber ( $We$ ). De posse dos valores dos parâmetros adimensionais mencionados, foi possível avaliar indiretamente a existência de efeitos de escala não desprezáveis nos resultados obtidos, com base em limites propostos por diversos pesquisadores, como indicado no item 3.5.

### 5.1.1 Profundidade a montante do defletor ( $h_0$ )

Para escoamentos sobre vertedouros com aeração induzida por dispositivo aerador, o comprimento de referência  $L_{ref}$  utilizado no cálculo de  $Fr$ ,  $Re$  e  $We$  costuma ser a profundidade do escoamento imediatamente a montante do defletor  $h_0$ , podendo esta ser facilmente medida em modelos físicos. Porém, nos casos onde não é possível medir-se a profundidade  $h_0$ , esta pode ser estimada da seguinte maneira (a depender do local onde está instalado o sistema aerador na calha):

- i. Sistema aerador imediatamente a jusante da ogiva do vertedouro:

Essa é a situação compatível com a aqui denominada  $D_1$ . Nesse caso, a profundidade  $h_0$  pode ser definida teoricamente, assumindo-se a igualdade entre as energias do escoamento nas seções de mínima energia (ou crítica, aproximadamente na crista do vertedouro) e de posição do defletor, desconsiderando-se as perdas de energia. Entende-se que essa previsão é válida, nessas situações, em razão da proximidade entre as seções consideradas.

- ii. Sistema aerador posicionado mais a jusante ao longo da calha:

Essa situação é compatível com a aqui denominada  $D_{10}$ . Vale ressaltar, porém, que a referida metodologia pode ser aplicada com o defletor posicionado em qualquer degrau (seja entre os degraus nº1 e 10, ou ainda mais a jusante), desde que se trate, ainda, de escoamento não aerado (isto é, desde que o escoamento não tenha atingido o ponto de início de aeração natural), como descrito a seguir.

Nesses casos, a estimativa da profundidade  $h_0$  pode ser feita com base na Equação 5.1, proposta por Meireles et al. (2012), devendo ser utilizada apenas na porção não aerada do escoamento (ou seja, é válida no intervalo  $0 \leq L_0/L_i \leq 1$ ). Recomenda-se, ainda, o uso da Equação 5.2 e Equação 5.3 para estimativa da profundidade no início da aeração  $h_i$  e do comprimento de início de aeração  $L_i$ , respectivamente, também propostas por Meireles et al. (2012).

$$\frac{h_0}{h_i} = 1,17 - 0,25 \frac{L_0}{L_i} + \frac{0,084}{L_0/L_i} \quad \text{Equação 5.1}$$

$$\frac{h_i}{k} = 0,35 F_k^{0,59} \quad \text{Equação 5.2}$$

$$\frac{L_i}{k} = 6,75 F_k^{0,76} \quad \text{Equação 5.3}$$

Comparando-se a profundidade  $h_0$  medida durante os ensaios com a profundidade calculada com base nos critérios expostos, as diferenças observadas foram sempre inferiores à ordem de 10% (no caso da condição D<sub>1</sub>) e 5% (no caso da condição D<sub>10</sub>), como apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Valores de profundidades medidas e calculadas com base nos critérios apresentados.

$q$ ( $m^2/s$ )	D1			D10		
	$h_0$ medida (m)	$h_0$ calculada (m)	Razão medida/calculada	$h_0$ medida (m)	$h_0$ calculada (m)	Razão medida/calculada
0,054	0,018	0,020	0,90	-	-	-
0,082	0,031	0,029	1,07	-	-	-
0,108	0,036	0,037	0,97	-	-	-
0,150	0,050	0,050	1,00	-	-	-
0,200	0,064	0,064	1,00	0,050	0,053	0,95
0,300	0,097	0,091	1,07	0,070	0,073	0,96
0,400	0,124	0,117	1,06	0,089	0,091	0,98
0,500	0,156	0,140	1,11	0,112	0,108	1,04

Em razão da semelhança entre as profundidades medidas e calculadas, foi dada sequência ao desenvolvimento do trabalho utilizando os valores calculados. Dessa forma, possíveis variações entre as profundidades medidas em ensaios equivalentes não influenciarão nos resultados obtidos. Além disso, Novakoski (2021), na análise de resultados associados à mesma instalação experimental que a do presente trabalho, também optou por utilizar os valores calculados. Desse modo, para manter a coerência na comparação entre os resultados, optou-se por adotar o mesmo padrão entre ambos os trabalhos<sup>58</sup>, uma vez que as análises não demonstraram impedimentos no emprego desse procedimento.

### 5.1.2 Cálculo dos parâmetros adimensionais e avaliação do efeito de escala

Para avaliar o nível de interferência dos efeitos de escala nos ensaios realizados, os números de Reynolds, Weber e Froude foram determinados, em conformidade com o que foi apresentado nos itens 3.5 e 4.1.4. A Tabela 5.3 apresenta os parâmetros adimensionais, associados às condições de aeração induzida no escoamento, para todas as vazões específicas  $q$  avaliadas neste trabalho. Considerando a profundidade do escoamento como sendo o comprimento de referência  $L_{ref}$ , o número de Reynolds equivale a  $Re = q/\nu$ , sendo assim, é constante para cada vazão específica avaliada. Para o cálculo dos números de Froude e Weber, considerou-se como comprimento de referência  $L_{ref}$  a profundidade do escoamento a montante do defletor  $h_0$  (resultando em  $Fr_0$  e  $We_0$ ). Além disso, os números de Reynolds e Weber foram também calculados considerando  $L_{ref} = L_j$

<sup>58</sup> Vale lembrar que os dados associados à condição D<sub>1</sub> foram também utilizados por Novakoski (2021).

(nesse caso, resultando em  $Re_j$  e  $We_j$ ), como sugerem alguns pesquisadores no que concerne à avaliação do efeito de escala, conforme apresentado no item 3.5.

Tabela 5.3 – Principais parâmetros adimensionais do escoamento ( $Fr$ ,  $Re$  e  $We$ ), considerando aeração induzida.

Condição	$q$ ( $m^2/s$ )	$L_{ref} = h_0$				$L_{ref} = L_j$		
		$h_0$ (m)	$Fr_0$	$Re$	$We_0$	$L_j$ (m)	$Re_j$	$We_j$
D <sub>1</sub>	0,054	0,020	6,10	$5,37 \times 10^4$	45	0,45	$1,21 \times 10^6$	212
	0,082	0,029	5,30	$8,16 \times 10^4$	56	0,45	$1,27 \times 10^6$	222
	0,108	0,037	4,85	$1,07 \times 10^5$	66	0,38	$1,09 \times 10^6$	209
	0,150	0,050	4,28	$1,49 \times 10^5$	79	0,38	$1,12 \times 10^6$	215
	0,200	0,064	3,94	$1,99 \times 10^5$	93	0,38	$1,17 \times 10^6$	224
	0,300	0,091	3,49	$2,99 \times 10^5$	116	0,38	$1,23 \times 10^6$	236
	0,400	0,117	3,19	$3,98 \times 10^5$	137	0,30	$1,02 \times 10^6$	219
	0,500	0,140	3,05	$4,98 \times 10^5$	156	0,30	$1,07 \times 10^6$	229
D <sub>10</sub>	0,200	0,053	5,23	$1,99 \times 10^5$	102	0,30	$1,13 \times 10^6$	242
	0,300	0,073	4,86	$2,99 \times 10^5$	130	0,30	$1,23 \times 10^6$	264
	0,400	0,091	4,65	$3,98 \times 10^5$	155	0,30	$1,31 \times 10^6$	282
	0,500	0,108	4,50	$4,98 \times 10^5$	178	0,30	$1,38 \times 10^6$	297

Como registrado na Tabela 5.3, para a mesma vazão específica  $q$ ,  $Fr_0$  da condição D<sub>10</sub> é superior ao da condição D<sub>1</sub>. Esse comportamento já era esperado e ocorre devido à redução da profundidade do escoamento no defletor ( $h_0$  na condição D<sub>10</sub> é inferior ao da condição D<sub>1</sub>, ver Tabela 5.2) e o conseqüente aumento da velocidade nessa seção.

Conforme exposto no Capítulo 3 (item 3.5), considerando como critério  $L_{ref} = h_0$ , os efeitos de escala associados às forças viscosas e de tensão superficial podem ser desprezados quando, em suma,  $Re > 1 \times 10^5$  e  $We_0 > 100$ . Sendo assim, como sugere a Tabela 5.3, é possível que os ensaios associados a vazões específicas  $q$  inferiores a  $0,20 m^2/s$  sejam influenciados por efeitos de escala relevantes quanto às forças de tensão superficial, já que  $We_0 < 100$ . Além destes, ensaios com  $q < 0,10 m^2/s$  podem estar sujeitos a efeitos de escala associados às forças viscosas, uma vez que  $Re < 1 \times 10^5$ .

Caso seja considerado o limite inferior de  $We_0 = 170$  para que os efeitos de escala sejam desprezáveis (valor este mais restritivo do que o anterior, de  $We_0 = 100$ , como indicado no item 3.5), apenas um dos ensaios estaria livre de efeitos de escala. Vale destacar, porém, que os valores de  $Re$  e  $We_0$  do presente trabalho estão em conformidade com estudos semelhantes: os ensaios de Terrier (2016), por exemplo, estão inseridos nas faixas de  $2,5 \times 10^5 < Re < 4,9 \times 10^5$  e  $87 < We_0 < 209$  – sendo importante salientar, ainda, que o referido autor identificou efeitos de escala apenas em ensaios com  $We_0 < 100$ , de modo geral. Sendo assim, em razão da semelhança entre os fenômenos avaliados neste trabalho e no de Terrier (2016), foi considerado que o primeiro critério exposto (cujo limite é  $We_0 = 100$ ) é o mais adequado nesse caso.

Ainda de acordo com a Tabela 5.3, se for considerado o critério  $L_{ref} = L_j$ , nenhum dos casos ensaiados estaria isento de efeitos de escala significativos, pois não atendem às condições de  $Re_j > 3,5 \times 10^6$  e  $We_j > 500$ .

Na Tabela 5.4 estão os valores de  $Fr$ ,  $Re$  e  $We$  associados ao escoamento submetido à aeração natural, para as mesmas vazões específicas avaliadas na condição de aeração induzida. Tomando a profundidade como comprimento de referência  $L_{ref}$ , os números de Froude e Weber estão relacionados à profundidade do escoamento no ponto de início de aeração ( $Fr_i$ ,  $We_i$ ), ao passo que o número de Reynolds, seguindo o mesmo raciocínio do escoamento com aeração induzida, assume valor constante ao longo da extensão da calha, a depender apenas da vazão específica  $q$ . No cálculo dos parâmetros  $Fr_i$  e  $We_i$  associados à condição NAT, a profundidade do escoamento no ponto de início de aeração ( $h_i$ ) foi estimada de acordo com Meireles et al. (2012), conforme Equação 5.2, já apresentada.

Tabela 5.4 – Principais parâmetros adimensionais do escoamento ( $Fr$ ,  $Re$  e  $We$ ), considerando aeração natural.

Condição	$q$ ( $m^2/s$ )	$Fr_i$	$Re$	$We_i$
NAT	0,054	4,94	$5,37 \times 10^4$	75
	0,082	5,04	$8,16 \times 10^4$	88
	0,108	5,27	$1,07 \times 10^5$	99
	0,150	5,57	$1,49 \times 10^5$	115
	0,200	5,71	$1,99 \times 10^5$	128
	0,300	5,92	$2,99 \times 10^5$	150
	0,400	6,10	$3,98 \times 10^5$	169
	0,500	6,33	$4,98 \times 10^5$	186

De acordo com os valores expostos na Tabela 5.4 e conforme limites associados a efeitos de escala em escoamentos sobre vertedouros com aeração natural (indicados no item 3.5), é provável que os ensaios onde  $q < 0,10 m^2/s$  estejam submetidos a efeitos de escala importantes, uma vez que não respeitam os limites mínimos de  $Re \approx 10^5$  e  $We_i \approx 100$ .

Considerando o exposto, caso os resultados da presente pesquisa sejam transferidos para a escala de protótipo, deve-se considerar a ocorrência de efeitos de escala não desprezáveis nos casos destacados (de modo geral, quando  $q < 0,20 m^2/s$ ). Entretanto, como mencionado no item 3.5, reitera-se que os resultados obtidos em modelo físico subestimam os valores de entrada de ar, se comparados aos valores que ocorrem em protótipo. Desse modo, no que se refere à capacidade de entrada de ar no sistema aerador, os resultados do modelo serão favoráveis à segurança.

Além disso, conforme recomendações de Pinto et al. (1982) e Volkart e Rutschmann (1984), reitera-se que os efeitos de escala serão minimizados caso sejam respeitadas as escalas geométricas entre 1:10 e 1:25, em média, na simulação de sistemas aeradores em vertedouros.

Por fim, a Figura 5.1 expõe as faixas de  $Fr_0$  consideradas em trabalhos semelhantes a este (aeração induzida em vertedouros em degraus), já mencionados no Capítulo 3, em conjunto com as faixas de valores investigadas neste trabalho. Os valores de  $Fr_0$  ensaiados estão entre 3 e 6, aproximadamente, estando também inseridos nas faixas contempladas pelos demais autores apresentados.

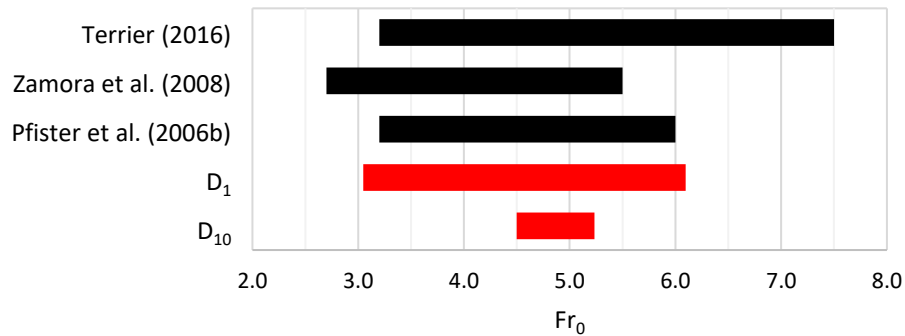


Figura 5.1 – Faixa de  $Fr_0$  de autores selecionados e do presente trabalho, nas condições de aeração induzida.

Com base na Figura 5.1, destaca-se a maior diferença entre o limite superior de  $Fr_0$  avaliado por Terrier (2016) e o do presente trabalho, o que pode ser explicado pelas distinções entre os modelos utilizados. O modelo de vertedouro utilizado por Terrier (2016) não possui uma ogiva padrão WES, mas sim o chamado *jetbox*, elemento que restringe a altura do escoamento e permite definir  $h_0$  e  $Fr_0$  de forma independente. Já os modelos de Pfister et al. (2006b) e Zamora et al. (2008) possuem ogivas similares a deste trabalho, o que pode justificar a maior semelhança de  $Fr_0$  entre estes.

## 5.2 REGIÕES E PONTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO

Este item apresenta, por meio de fotografias, o aspecto visual do escoamento nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ . É dada ênfase à identificação das regiões e dos pontos característicos, como o ponto de início de aeração e a zona de *blackwater*, como destacado no Capítulo 4. Vale ressaltar que, em razão da própria característica intermitente da aeração no escoamento, os pontos que delimitam a ocorrência de tais regiões não são fixos ao longo da calha, para a mesma vazão, e, desse modo, foram identificados e definidos com base na análise visual do comportamento médio do escoamento.

Na condição NAT, avaliaram-se os pontos de início de aeração incipiente e total, ao passo que, nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , foram analisados o comprimento do jato e da região de *blackwater*, em conformidade com os critérios dispostos no Capítulo 4. Neste item, os referidos locais foram expostos em detalhe, por meio de fotografias obtidas ao longo dos ensaios, apenas para algumas vazões específicas  $q$ . Os resultados associados a todas as vazões ensaiadas estão resumidos na Tabela 5.5, apresentada mais adiante.

A Figura 5.2 ilustra o aspecto do escoamento na condição NAT para  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ . Na vista frontal (Figura 5.2a) é possível identificar a diferença entre as regiões de início de aeração incipiente e total. Enquanto esta é caracterizada pela aeração completa da seção avaliada (tanto em largura quanto em profundidade), a primeira indica a região onde há a subdivisão de duas zonas distintas, no que diz respeito à visualização da aeração: uma onde o escoamento tem aspecto transparente (portanto, sem ar incorporado), e outra onde é possível identificar o início da presença de bolhas de ar, ainda que de forma intermitente, em toda a largura da calha. Essas duas zonas estão destacadas na Figura 5.2b.

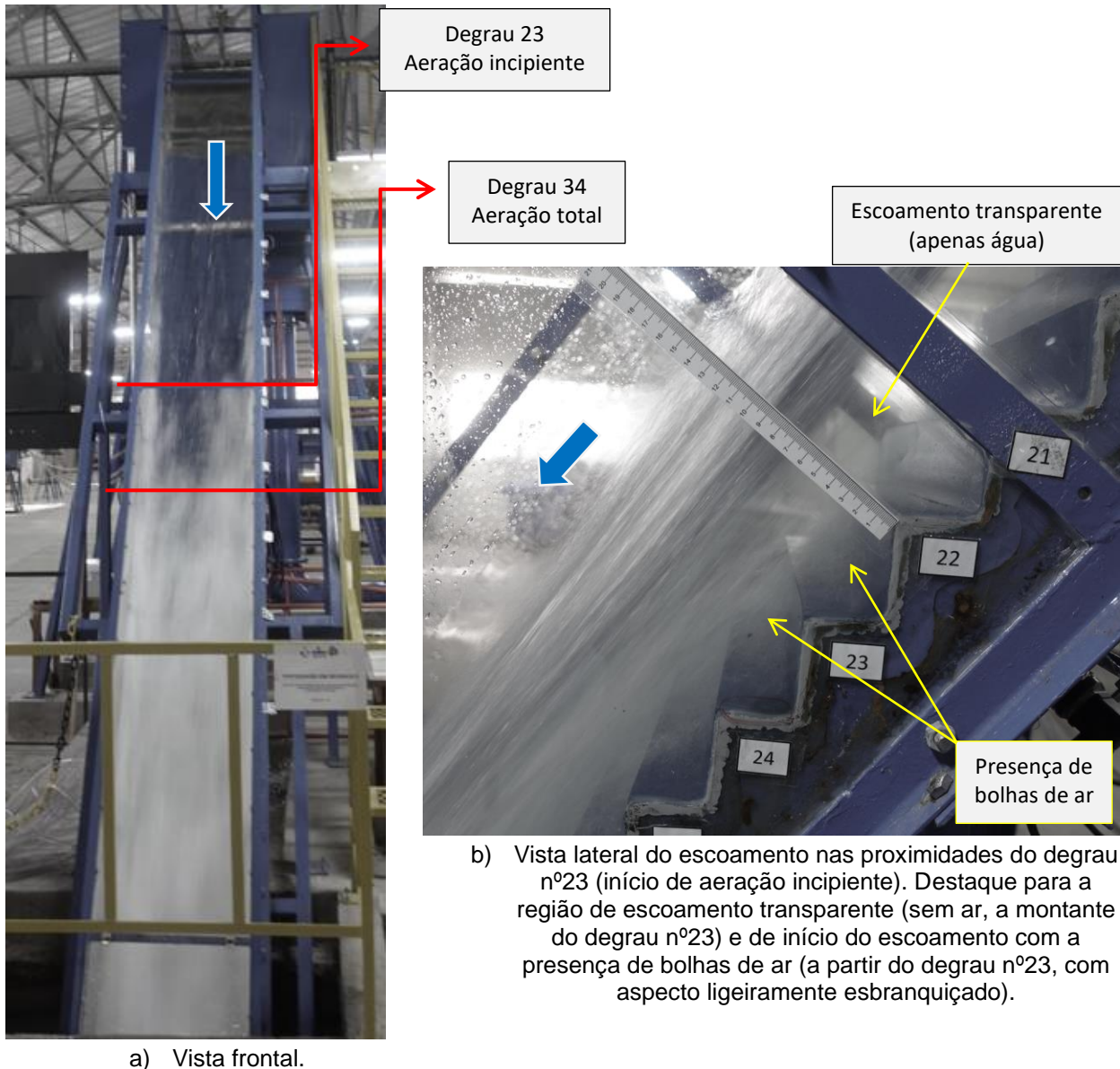


Figura 5.2 – Fotografias do escoamento na condição NAT,  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ , com destaque para pontos característicos.

A Figura 5.3 apresenta o aspecto do escoamento, em vista lateral, na condição  $D_1$  e na vazão  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ . É dado destaque para o núcleo de *blackwater* (delimitado por linhas vermelhas), que se desenvolve até o degrau nº16, bem como para a tubulação de entrada de ar e para a posição do defletor, instalados no degrau nº1. Nessa condição, o aspecto do escoamento é semelhante ao já

identificado por Pfister et al. (2006a) e Novakoski (2021) – ver Figura 3.26. A *blackwater* se desenvolve até que a aeração do escoamento inferior à *blackwater* (proveniente do sistema aerador) atinja a parcela superior de escoamento aerado (proveniente da superfície livre). A região de impacto do jato não está destacada na Figura 5.3, mas é avaliada posteriormente.

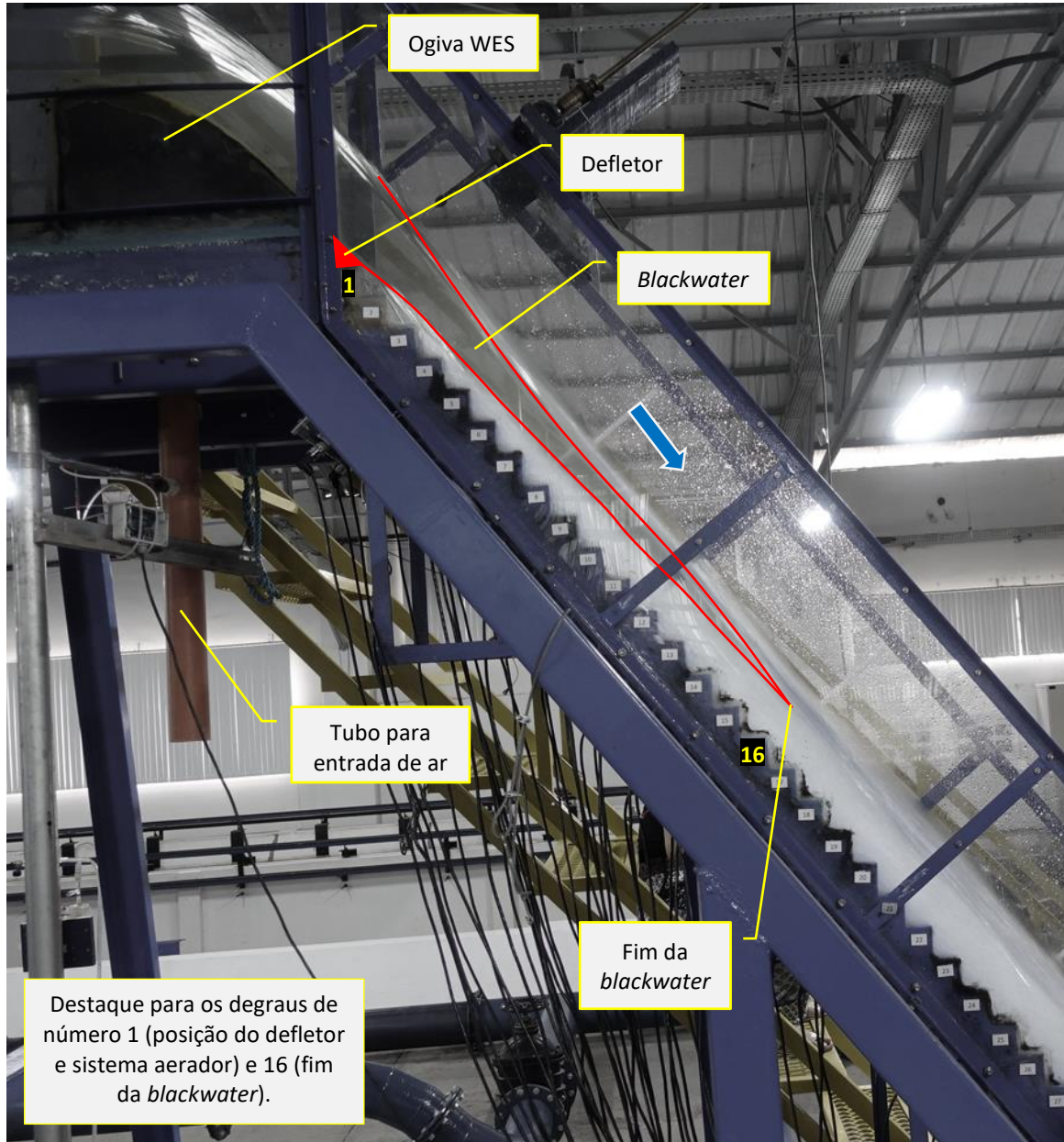


Figura 5.3 – Fotografias do escoamento, em vista lateral, na condição  $D_1$ ,  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ , com destaque para pontos característicos. A representação do defletor é ilustrativa, apenas para indicar a posição.

O aspecto do escoamento na condição  $D_{10}$ , por sua vez, considerando a vazão  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , aparece na Figura 5.4. Nesse caso, a Figura 5.4a apresenta a visão geral do escoamento, com destaque para a superfície da linha d'água, ao passo que, na Figura 5.4b, destaca-se a evolução do núcleo de *blackwater*, a partir do degrau nº10. O comportamento do escoamento é muito semelhante ao já identificado por Terrier (2016) – como exposto na Figura 3.26. A região de impacto do jato não está destacada na Figura 5.4, mas é analisada mais adiante.

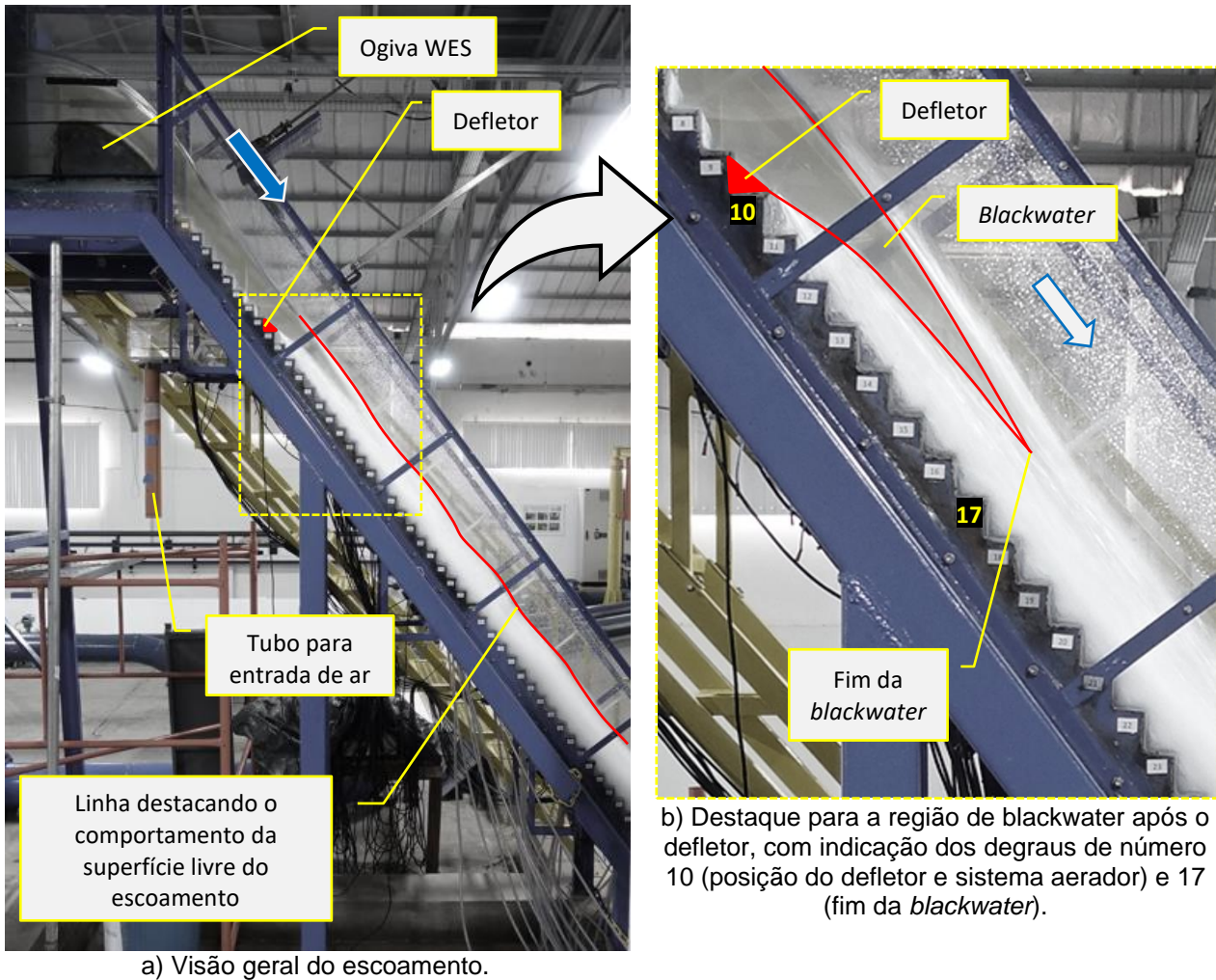
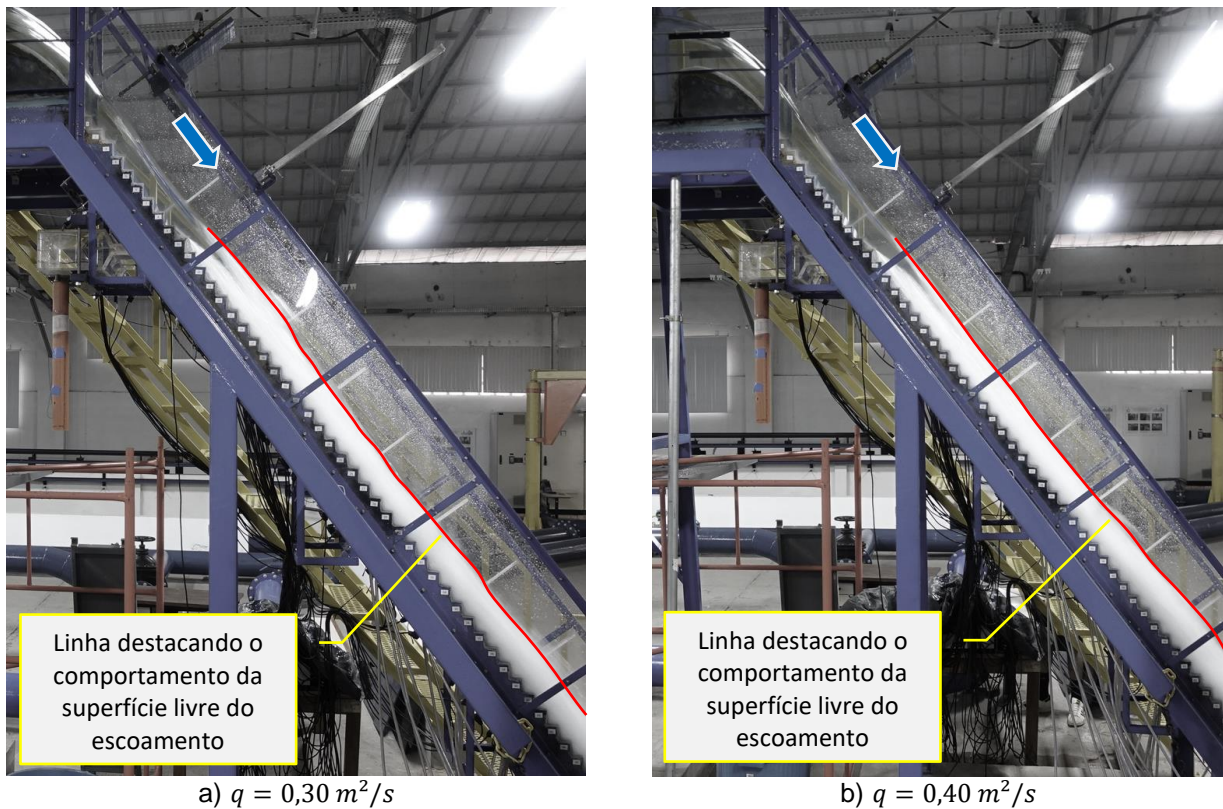


Figura 5.4 – Fotografias do escoamento, em vista lateral, na condição  $D_{10}$ ,  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , com destaque para regiões e pontos característicos. A representação do defletor é ilustrativa, apenas.

Novakoski et al. (2020) identificaram um padrão ondulatório crescente (em profundidade) no aspecto visual do escoamento na condição  $D_1$ , na região a montante do escoamento quase uniforme. No caso da condição  $D_{10}$ , independentemente da vazão avaliada, esse comportamento não foi identificado. A Figura 5.5 ilustra o escoamento na condição  $D_{10}$ , nas vazões  $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  (a vazão  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  está representada na Figura 5.4), evidenciando a inexistência (ou, pelo menos, a impossibilidade da identificação clara) de um padrão ondulatório na superfície da linha d'água. Na condição  $D_{10}$ , o aspecto visual da superfície da linha d'água está mais próximo daquele encontrado por Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016).





a)  $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$  b)  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$   
 Figura 5.5 – Aspecto visual geral do escoamento, em vista lateral, na condição  $D_{10}$ , com destaque para o comportamento da superfície da linha d'água.

As regiões e pontos característicos do escoamento, definidos segundo critérios indicados no item 4.2, aparecem na Tabela 5.5, para todas as vazões ensaiadas. Nas condições NAT e  $D_1$ , avalia-se a faixa completa de vazões específicas ( $0,054 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ), ao passo que, na condição  $D_{10}$ , a faixa é mais restrita ( $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Isso porque, como já mencionado, nas vazões  $q < 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  o início da aeração natural acontece a montante do degrau nº10. Mais detalhes associados às configurações NAT e  $D_1$  podem ser encontrados em Canellas (2020) e Novakoski (2021), respectivamente.

Na Tabela 5.5, números inteiros indicam o parâmetro em termos de degraus, ao passo que o valor entre parênteses apresenta essa informação em termos de comprimento, medido no sentido longitudinal à calha (a contar do início da calha em degraus e também do final do defletor, conforme indicado). Para maiores detalhes, ver notas de rodapé da Tabela 5.5.

Como indicado na Tabela 5.5, com o aumento da vazão, o ponto de impacto do jato na condição  $D_1$  tende a ocorrer em degraus mais a montante (e, nesse caso, o comprimento do jato  $L_j$  diminui). Isso acontece em razão da profundidade do escoamento sobre o defletor, que aumenta com o aumento da vazão e, desse modo, proporciona menor alcance do jato – devido ao maior peso de água. O mesmo não foi observado na condição  $D_{10}$ : o comprimento do jato  $L_j$  manteve-se o mesmo, independentemente da vazão ensaiada. Na condição  $D_1$  é possível visualizar um jato íntegro, formado quase que exclusivamente por água. Já na condição  $D_{10}$  foi possível identificar com maior clareza que a geratriz inferior do jato é formada por uma mistura ar-água, possivelmente devido à:

Tabela 5.5 – Parâmetros característicos do escoamento em termos de degraus e comprimento longitudinal da calha.

q (m <sup>2</sup> /s)	Parâmetros em termos do nº do degrau onde ocorrem e, entre parênteses, comprimento a contar do início da calha em degraus <sup>59</sup>						Em termos de número de degraus abrangido pelo parâmetro e, entre parênteses, comprimento a contar do final do defletor <sup>60</sup>			
	NAT		D <sub>1</sub>		D <sub>10</sub>		D <sub>1</sub>		D <sub>10</sub>	
	Início aeração incipiente	Início aeração total	Impacto do jato	Final da <i>blackwater</i>	Impacto do jato	Final da <i>blackwater</i>	Jato (L <sub>j</sub> )	<i>Blackwater</i> (L <sub>b</sub> )	Jato (L <sub>j</sub> )	<i>Blackwater</i> (L <sub>b</sub> )
0,054	2 (0,15 m)	3 (0,23 m)	7 (0,53 m)	-	-	-	6 (0,45 m)	-	-	-
0,082	4 (0,30 m)	6 (0,45 m)	7 (0,53 m)	3 (0,23 m)	-	-	6 (0,45 m)	2 (0,15 m)	-	-
0,108	6 (0,45 m)	10 (0,75 m)	6 (0,45 m)	5 (0,38 m)	-	-	5 (0,38 m)	4 (0,30 m)	-	-
0,150	10 (0,75 m)	14 (1,05 m)	6 (0,45 m)	7 (0,53 m)	-	-	5 (0,38 m)	6 (0,45 m)	-	-
0,200	11 (0,83 m)	18 (1,35 m)	6 (0,45 m)	10 (0,75 m)	14 (1,05 m)	12 (0,90 m)	5 (0,38 m)	9 (0,68 m)	4 (0,30 m)	2 (0,15 m)
0,300	18 (1,35 m)	26 (1,95 m)	6 (0,45 m)	13 (0,98 m)	14 (1,05 m)	13 (0,98 m)	5 (0,38 m)	12 (0,90 m)	4 (0,30 m)	3 (0,23 m)
0,400	23 (1,73 m)	34 (2,55 m)	5 (0,38 m)	16 (1,20 m)	14 (1,05 m)	15 (1,13 m)	4 (0,30 m)	15 (1,13 m)	4 (0,30 m)	5 (0,38 m)
0,500	28 (2,10 m)	40 (3,00 m)	5 (0,38 m)	19 (1,43 m)	14 (1,05 m)	17 (1,28 m)	4 (0,30 m)	18 (1,35 m)	4 (0,30 m)	7 (0,53 m)

<sup>59</sup> Por exemplo, considerando a vazão  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  na condição NAT, o início da aeração incipiente ocorre no degrau nº23, que está 1,73 m a jusante do início da calha em degraus. Considerando ainda a vazão  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ , na condição D<sub>1</sub> o impacto do jato ocorre no degrau nº5 e o final da *blackwater* no degrau nº16 (respectivamente, 0,38 m e 1,20 m a jusante do início da calha em degraus), ao passo que, na condição D<sub>10</sub>, os mesmos pontos característicos ocorrem, respectivamente, nos degraus nº14 e 15 (1,05 m e 1,13 m a jusante do início da calha em degraus).

<sup>60</sup> Por exemplo, na vazão  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  e na condição D<sub>1</sub>, o comprimento do jato formado pelo escoamento a jusante do defletor abrange quatro degraus (portanto, iniciando no degrau nº2 e se estendendo até o degrau nº5, dado que o degrau nº1 comporta o sistema aerador), ao passo que a região de *blackwater* compreende quinze degraus (iniciando no degrau nº2 e se estendendo até o degrau nº16), conforme Figura 5.3. Para a condição D<sub>10</sub> e  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , por exemplo, o comprimento do jato também abrange quatro degraus (porém, nesse caso, dado que o sistema aerador está posicionado no degrau nº10, o início do jato se dá no degrau nº11 e se estende até o degrau nº14), ao passo que a região de *blackwater* compreende cinco degraus (iniciando no degrau nº11 e se estendendo até o degrau nº15), conforme Figura 5.4. Em resumo, os valores em termos de números de degraus dessas colunas correspondem aos valores das colunas anteriores, subtraídos da posição do sistema aerador (isto é, subtraindo um degrau da condição D<sub>1</sub>, e dez degraus da condição D<sub>10</sub>).

- i. maior entrada de ar pelo sistema aerador e consequente maior incorporação de ar pelo escoamento nessa condição, se comparada com a condição  $D_1$ ;
- ii. maior velocidade do escoamento na região, o que torna as forças inerciais mais preponderantes às de tensão superficial entre o ar e a água, do que na condição  $D_1$ .

Na condição  $D_{10}$ , o aspecto “fragmentado” do jato pode estar relacionado com ambas as hipóteses, o que favorece a desintegração do escoamento, podendo ser uma justificativa para o ponto de impacto ter resultado o mesmo, independentemente da vazão ensaiada. A Figura 5.6 ilustra o fenômeno descrito, nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , para  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ .

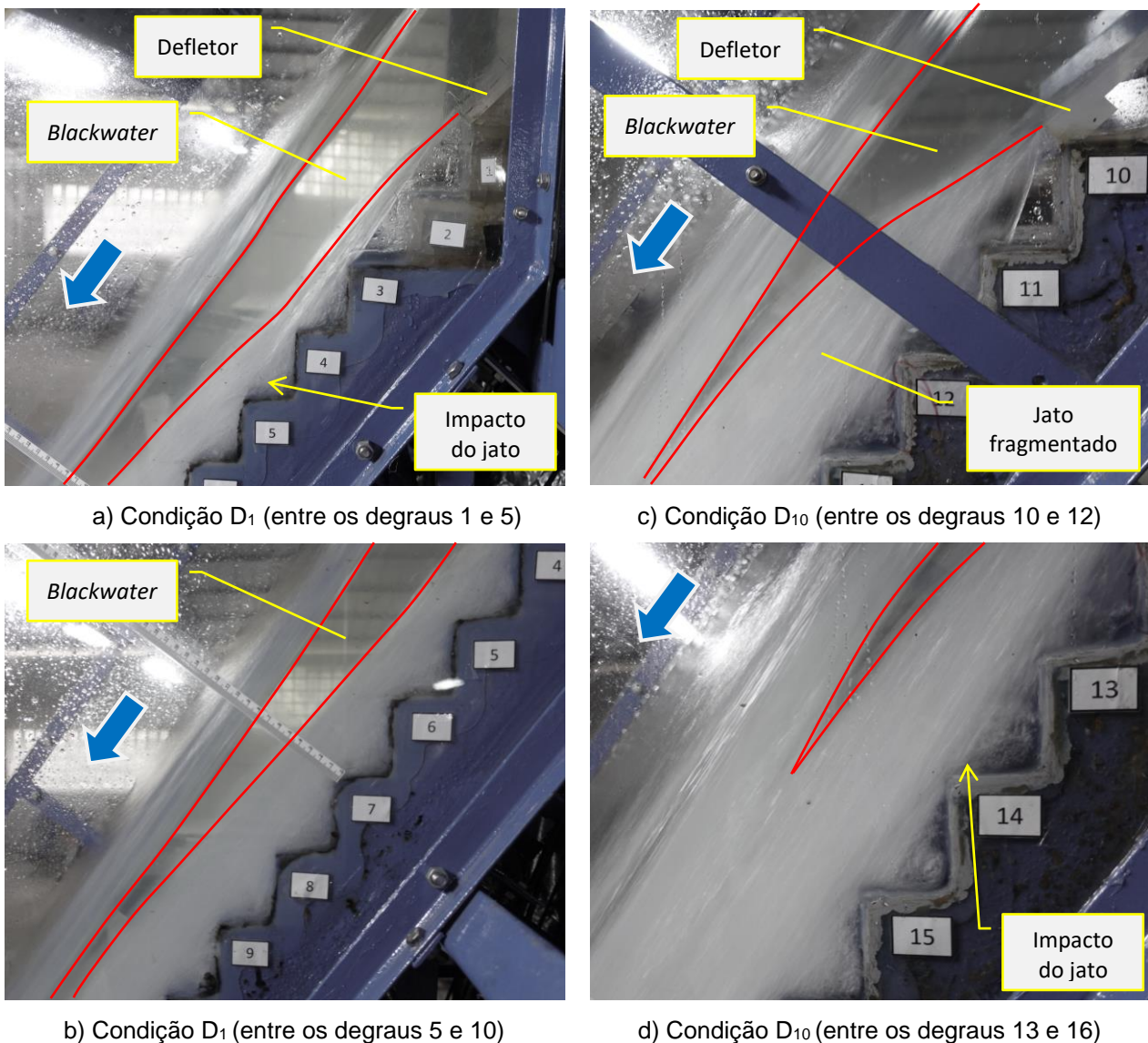


Figura 5.6 – Aspecto do jato formado pelo escoamento nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , em vista lateral, nas regiões de impacto do jato e ocorrência de *blackwater*,  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Vale destacar que o local de impacto do jato é um dos pontos mais importantes na caracterização do escoamento com aeração induzida, uma vez que a partir dele ocorre a aeração inferior do escoamento (nas proximidades da calha em degraus, abaixo da *blackwater*).

Ainda com relação à Tabela 5.5, no que concerne ao comprimento da *blackwater*  $L_b$ , pode-se identificar significativa diferença entre os resultados das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Isso está ilustrado de forma esquemática na Figura 5.7, para  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Entende-se que essa diferença ocorre em virtude das mesmas observações indicadas anteriormente, isto é, tanto da maior incorporação de ar (na condição  $D_{10}$  frente à condição  $D_1$ ), quanto da maior velocidade do escoamento nas proximidades do ponto de impacto do jato (também para  $D_{10}$  em comparação à  $D_1$ ) o que favorece a mistura do escoamento e a diminuição do comprimento da *blackwater* no caso de  $D_{10}$ .

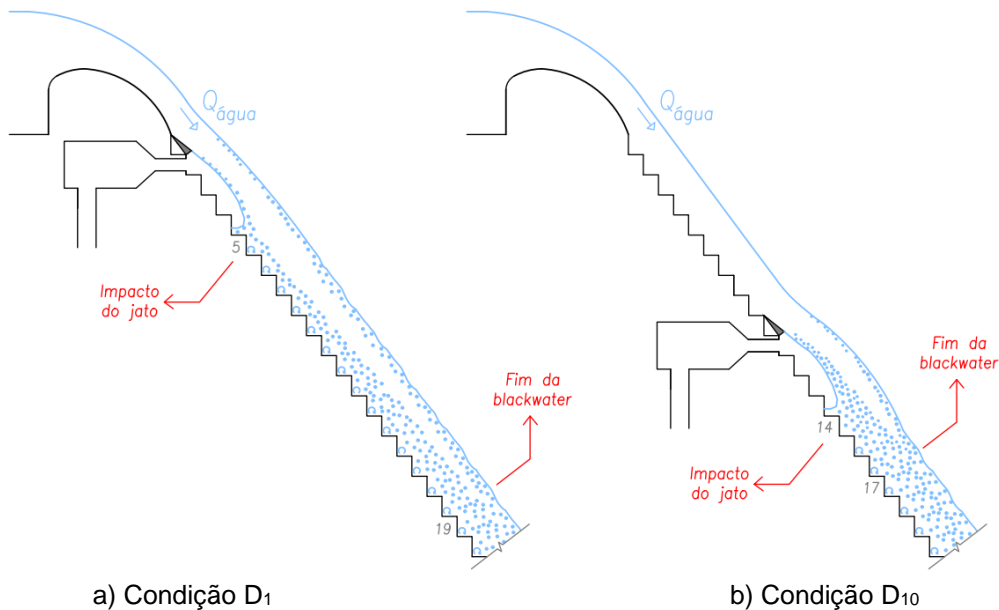


Figura 5.7 – Representação esquemática, em vista lateral, das condições  $D_1$  e  $D_{10}$  para  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Com base na representação ilustrada na Figura 5.7, destaca-se ainda que, na condição  $D_1$ , desde o impacto do jato nos degraus até o fim da *blackwater* (no caso, entre os degraus nº5 e nº19, para  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ), o ar existente no escoamento em contato com os degraus é aquele proveniente do sistema aerador, apenas. Isso porque o núcleo de *blackwater* não permite trocas entre a aeração inferior (proveniente do sistema aerador) e superior (proveniente da superfície livre) do escoamento. Já na condição  $D_{10}$ , visto que o final da *blackwater* ocorre ainda no desenvolvimento do jato, ou muito próximo do impacto, o ar em contato com os degraus é formado pela interação entre a aeração inferior e superior, já na zona imediatamente a jusante do impacto do jato (ou muito próxima disso).

Contudo, deve-se ressaltar que, em razão do posicionamento do sistema aerador na calha, no caso da condição  $D_1$  há ar no escoamento em regiões a montante do degrau nº10, diferentemente da condição  $D_{10}$  (que, nessa região, está sujeita à aeração natural, não havendo, ainda, ar em contato com a calha) – ver Figura 5.7.

As observações dos parágrafos anteriores evidenciam a importância de se definir, de modo criterioso, o posicionamento do sistema aerador ao longo da calha. Alguns métodos para definição do posicionamento otimizado do sistema são explorados no APÊNDICE B.

Na condição  $D_1$  e vazão  $q = 0,054 \text{ m}^2/\text{s}$ , não foi possível detectar a ocorrência de uma região de *blackwater* bem definida, sendo assim, para este caso, não há comprimento  $L_b$  identificado na Tabela 5.5. Isso ocorre em razão da baixa profundidade do escoamento e da possível aeração total da lâmina d'água enquanto o jato está em desenvolvimento (a montante do impacto). O escoamento nesta situação está apresentado na Figura 5.8.

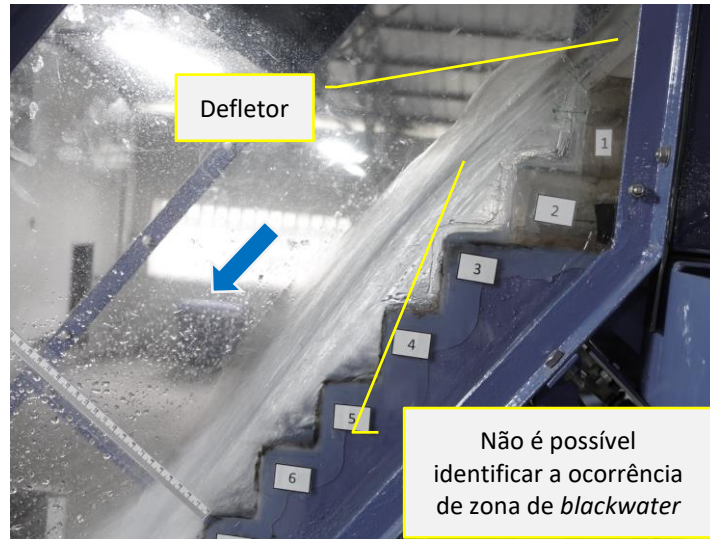


Figura 5.8 – Fotografias do escoamento, em vista lateral, na condição  $D_1$ ,  $q = 0,054 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Apenas a título de comparação entre os pontos característicos das condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , no que é relativo à aeração do escoamento, pode-se sugerir a seguinte analogia:

- i. Uma vez que o ponto de início de aeração incipiente na condição NAT ( $L_i$ ) é o local onde se observa a existência das primeiras bolhas de ar no escoamento, este ponto pode ser equivalente ao de impacto do jato nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  (visto que é nesta região que se observa o início do escoamento aerado, na condição de aeração induzida);
- ii. De forma similar, o local de início de aeração total na condição NAT ( $L_a$ ) parece ser equivalente à região de final da *blackwater* nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  (visto que se trata da zona onde há aeração completa do escoamento, em profundidade).

Com relação à configuração NAT e às vazões mais altas avaliadas ( $q \geq 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ ), para cada situação, o comprimento característico representado pelo início da aeração natural do escoamento (seja ele incipiente ou total) é sempre superior ao comprimento do jato  $L_j$ , das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , e até mesmo do comprimento da *blackwater*  $L_b$ . Para a vazão específica  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , por exemplo, conforme Tabela 5.5, na condição NAT a aeração natural total ocorre nas proximidades do degrau nº40, enquanto o final da *blackwater* nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  ocorre ainda a montante do degrau nº20 (ver Tabela 5.5 e Figura 5.7). De modo similar, o início de aeração incipiente na condição NAT ocorre no degrau nº 28, enquanto o impacto do jato se dá nos degraus nº5 e 14, respectivamente, nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Se considerados todos os comprimentos a contar do início da calha em degraus, enquanto na condição NAT são necessários 2,10 m de calha para que sejam

observados os primeiros indícios de aeração no escoamento, nas situações de aeração induzida esse comprimento se reduz a 0,38 m (condição  $D_1$ ) e 1,05 m (condição  $D_{10}$ , isto é, 0,30 m a jusante do defletor, uma vez que o sistema aerador está a 0,75 m do início da calha em degraus).

Esse comportamento evidencia o fato de que a aeração induzida do escoamento, quando comparada com a aeração natural, tem a vantagem de antecipar o início da aeração ao longo da calha e, conseqüentemente, reduzir a chance de ocorrência de danos associados à cavitação (desde que a concentração de ar no escoamento seja suficiente para tal). Naturalmente, em razão das especificidades e das distinções entre os escoamentos nas condições de aeração natural e induzida, a analogia proposta não deve ser assumida como rigorosa ou fiel ao escoamento nessas condições. Pelo contrário, possui teor prático, servindo apenas como comparativo geral entre as principais regiões e pontos característicos do escoamento nessas condições.

Por fim, para ilustrar mais uma vez as distinções no aspecto visual do escoamento entre as condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , a Figura 5.9 apresenta os registros fotográficos das referidas configurações, em ensaios na vazão  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ , em vista frontal. Na condição NAT (Figura 5.9a), fica evidente a ocorrência de duas zonas distintas no que diz respeito à aeração do escoamento: uma delas representada pelo escoamento transparente (a montante do degrau nº30, aproximadamente), formado quase que exclusivamente por água, e outra a jusante desta, caracterizada pelo escoamento de aspecto branco (mistura ar-água). Além disso, com base no aspecto visual do escoamento, é clara a diferença entre a aeração da lâmina nas condições  $D_1$  (Figura 5.9b) e  $D_{10}$  (Figura 5.9c). Enquanto nesta o escoamento apresenta aspecto branco, quase que de forma uniforme, a partir do degrau nº10 (aproximadamente), naquela fica evidente a ocorrência de uma região com a aeração em desenvolvimento (desde o impacto do jato até o degrau nº30, aproximadamente). Apenas a partir do degrau nº40 pode-se dizer que o aspecto visual do escoamento é semelhante nas três condições avaliadas (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ).

Na condição NAT, a calha do vertedouro só poderá estar protegida dos efeitos nocivos da cavitação em regiões localizadas após o início da aeração natural (a depender, ainda, da concentração de ar). Nas condições de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ), nota-se que a parcela inferior do escoamento passa a ser composta por uma mistura ar-água desde o ponto de impacto do jato, conforme pode ser identificado nos registros fotográficos (Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.6). Embora nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  possa ser identificada a existência de um escoamento aerado a partir do ponto de impacto do jato, não é possível afirmar, apenas por meio da análise visual do escoamento, se a concentração de ar presente nessa região é suficiente para proteger a estrutura dos possíveis danos causados pela cavitação. Para tal, é necessária a medição da concentração de ar em laboratório, ou a estimativa desse parâmetro com base, por exemplo, em modelos de previsão propostos por autores que já estudaram o fenômeno. Isso é avaliado no item 5.6 deste trabalho.



Figura 5.9 – Fotografias do escoamento, em vista frontal, nas condições a) NAT, b)  $D_1$  e c)  $D_{10}$ ,  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ . Os números em destaque representam os números dos degraus.

### 5.2.1 Previsão do comprimento do jato $L_j$

Como mencionado no item 3.4.2, na análise de parâmetros associados a sistemas aeradores, o comprimento do jato  $L_j$  tem papel importante, uma vez que está associado não apenas às características de entrada de ar no conjunto, como também às regiões do escoamento a jusante. No referido item, ainda, foram apresentadas equações de previsão do parâmetro, propostas por outros autores, em função do número de Froude do escoamento  $Fr_0$ , da profundidade  $h_0$  e de características geométricas da estrutura, como a espessura do defletor  $t$ , dentre outras.

O ponto de impacto do jato na calha em degraus para as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  está apresentado na Tabela 5.5, tendo sido já introduzido e abordado anteriormente. Conforme observado nos ensaios, na condição  $D_{10}$  o ponto de impacto manteve-se no mesmo degrau, independentemente da vazão do escoamento, ao passo que, na condição  $D_1$ , o jato incidiu em porções mais a montante da calha, com o aumento da vazão.

A Figura 5.10 apresenta a estimativa do comprimento do jato  $L_j$ , nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , com base em equações de previsão de autores selecionados (apresentados no item 3.4.2), em comparação com os valores observados experimentalmente (medidos). A reta tracejada estaria associada à concordância perfeita entre os valores medidos (em laboratório) e estimados (com base nas equações de previsão). Os resultados são apresentados tanto em termos da relação  $L_j/h_0$  (Figura 5.10a) quanto em termos de  $L_j$  isoladamente (Figura 5.10b). Vale destacar que os modelos de Pfister et al. (2006a) – Equação 3.32 – e Terrier (2016) – Equação 3.33 – consideram sistema aerador instalado em calha em degraus, ao passo que o modelo de Pfister e Hager (2010a) – Equação 3.31 – diz respeito à calha lisa, tendo sido este inserido na análise apenas a título de comparação. Os intervalos de validade dos parâmetros avaliados por cada autor constam nas notas de rodapé da Tabela 3.7 e também no APÊNDICE E. Apenas os casos enquadrados nos limites de validade das equações propostas pelos respectivos autores foram considerados aqui.

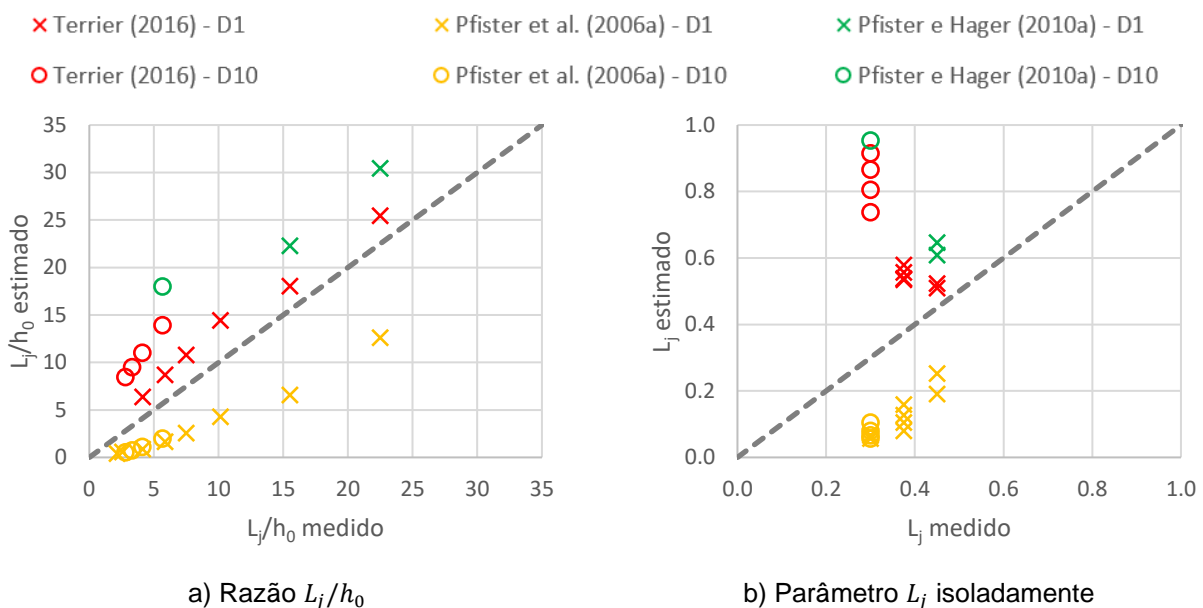


Figura 5.10 – Estimativa do comprimento do jato  $L_j$ , com base em autores selecionados, em comparação com valores medidos.

Como sugere a Figura 5.10, o modelo mais adequado para previsão de  $L_j$  seria o de Terrier (2016), porém, apenas para a condição  $D_1$  (dado que na condição  $D_{10}$  o valor estimado é consideravelmente distinto do medido, em mais de 100%). Para os demais casos, de modo geral, os valores estimados com base nas equações dos autores não se aproximam dos medidos.



Conforme literatura (ver item 3.4.2), o número de Froude do escoamento  $Fr_0$ , a razão  $t/h_0$ , bem como o ângulo de inclinação da calha  $\alpha$  e do defletor  $\theta$  parecem exercer influência no parâmetro  $L_j/h_0$ . A Figura 5.11 apresenta a relação entre os referidos parâmetros, considerando os dados das condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>. Nesse caso contempla-se  $Fr_0$ , bem como a razão  $t/h_0$ , além de relações que consideram o parâmetro de energia  $Z_0$  do escoamento (ver Figura 4.3). Não foram considerados os ângulos  $\alpha$  e  $\theta$  uma vez que estes são constantes neste trabalho.

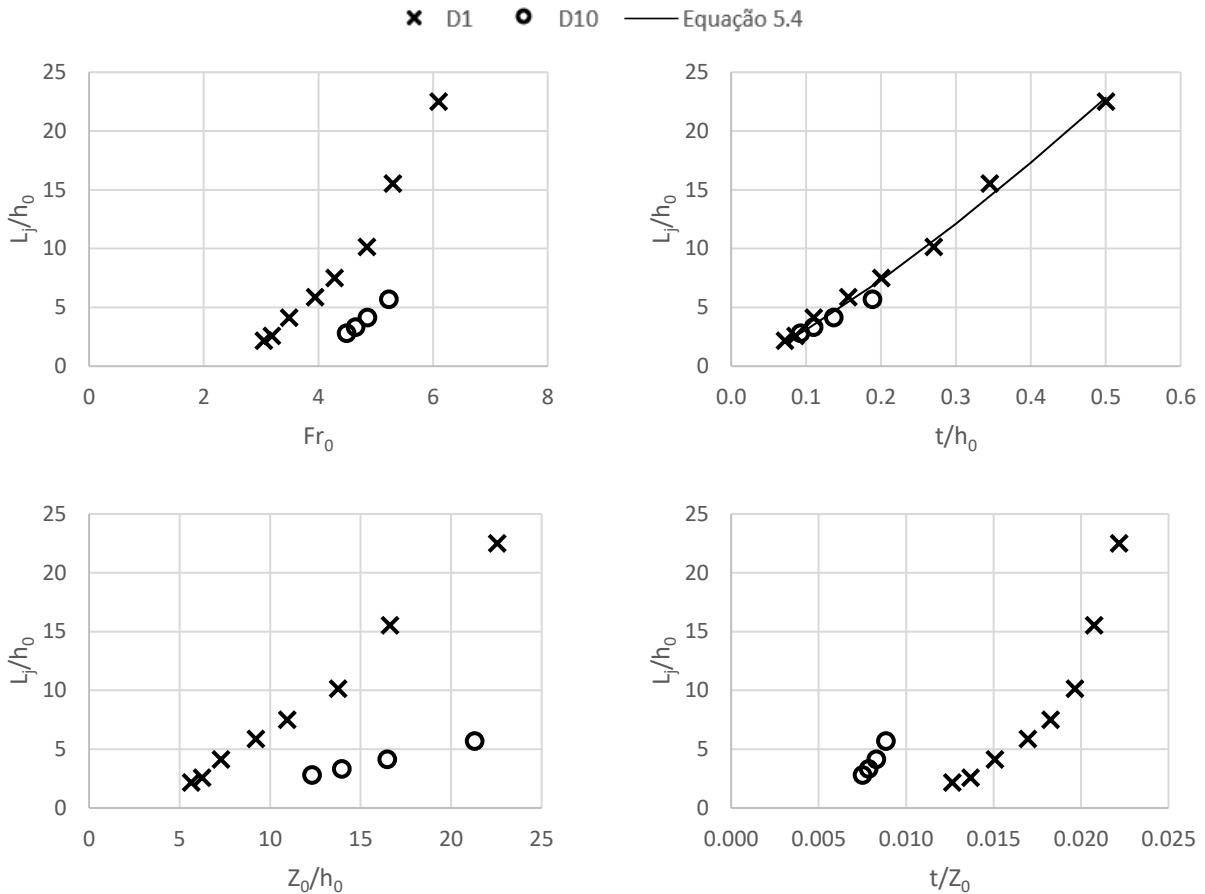


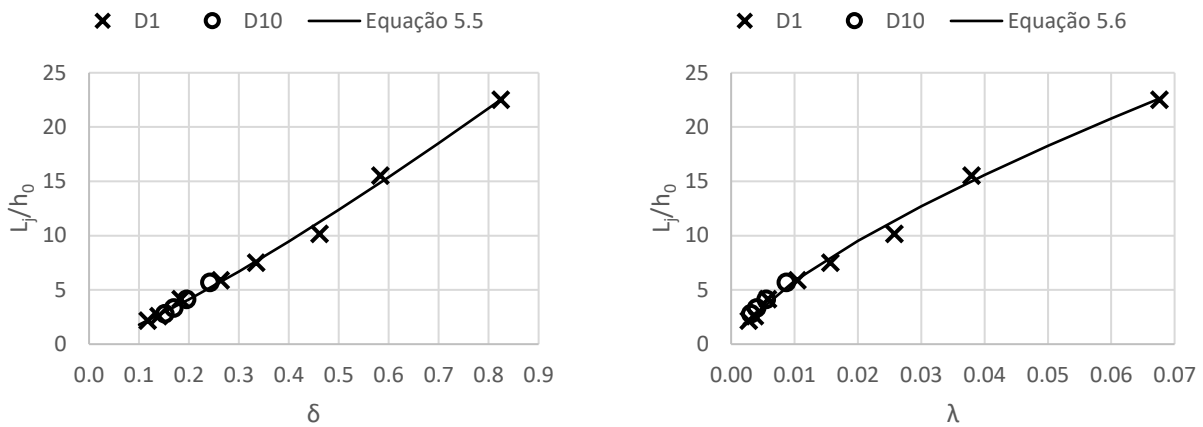
Figura 5.11 – Influência de parâmetros selecionados na razão  $L_j/h_0$ .

Como indica a Figura 5.11, todos os parâmetros apresentados parecem influenciar a relação  $L_j/h_0$ . Ainda, os dados sugerem que é possível estabelecer uma equação para estimativa de  $L_j/h_0$  em função de  $t/h_0$ , dada pela Equação 5.4 ( $R^2 = 0,99$ ;  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,50$ ), englobando tanto a condição D<sub>1</sub> quanto a D<sub>10</sub>.

$$\frac{L_j}{h_0} = 54,03 \left( \frac{t}{h_0} \right)^{1,243} \tag{Equação 5.4}$$

Combinações entre os adimensionais expostos na Figura 5.11 indicam que a relação  $L_j/h_0$  pode ser bem representada pelos parâmetros  $\delta$  e  $\lambda$ , como mostra a Figura 5.12, sendo  $\delta$  dado pela Equação 5.5 ( $R^2 = 0,99$ ;  $0,10 \leq \delta \leq 0,80$ ) e  $\lambda$  pela Equação 5.6 ( $R^2 = 0,99$ ;  $0,02 \leq \lambda \leq 0,07$ ). Além destas, uma série de outras combinações foi considerada – como a envolvendo os parâmetros  $Fr_0$

e  $t/h_0$ , a exemplo da Equação 3.33, proposta por Terrier (2016). Contudo, as relações expressas por  $\delta$  (Equação 5.5) e  $\lambda$  (Equação 5.6) foram, dentre todos os testes realizados, as que apresentaram os melhores ajustes.



a) Parâmetro  $\delta$  – Equação 5.5

b) Parâmetro  $\lambda$  – Equação 5.6

Figura 5.12 – Representação gráfica de parâmetros para previsão da razão  $L_j/h_0$ .

$$\frac{L_j}{h_0} = 28,40 \delta^{1,20} \text{ onde } \delta = \frac{t}{Z_0} Fr_0^2 \quad \text{Equação 5.5}$$

$$\frac{L_j}{h_0} = 153,23 \lambda^{0,71} \text{ onde } \lambda = \frac{t}{h_0} \frac{t}{Z_0} Fr_0 \quad \text{Equação 5.6}$$

onde

$Z_0$  é o parâmetro associado à energia do escoamento imediatamente a montante do dispositivo aerador, a contar da linha de energia crítica [m].

Deve-se atentar que o uso da Equação 5.5 e Equação 5.6 deve estar limitado a casos similares aos aqui avaliados, isto é, calhas inclinadas com ângulo  $\alpha = 53,13^\circ$ ,  $3 \leq Fr_0 \leq 6$ ,  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,50$  e defletor com ângulo  $\theta = 7,6^\circ$ . Uma vez que essas equações consideram parâmetros do escoamento no local de instalação do aerador (como  $h_0$ ,  $Fr_0$  e  $Z_0$ ), admite-se que sua aplicação seja adequada para situações onde o sistema esteja posicionado em qualquer ponto ao longo da calha (ou seja, não apenas quando posicionado necessariamente nos degraus nº1 ou nº10). Porém, para confirmação desta hipótese, é necessário fazer uso das referidas equações também nessas situações (e comparar os resultados calculados com os observados em instalações experimentais que representem esses casos).

No APÊNDICE F as equações aqui propostas para previsão do comprimento do jato  $L_j$  (Equação 5.5 e Equação 5.6) foram verificadas com base em dados experimentais coletados em outros modelos físicos.

### 5.3 COEFICIENTE DE ENTRADA DE AR $\beta$

Conforme mencionado no item 3.4.1, o principal parâmetro utilizado para quantificar a entrada de ar em sistemas aeradores é o coeficiente de entrada de ar  $\beta$ . Este tópico contempla os valores

medidos do referido coeficiente, nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Além disso, são analisados os resultados desse coeficiente, com base na estimativa por meio de equações propostas por outros autores. Por fim, propõe-se uma nova equação para permitir a previsão de  $\beta$  em sistemas aeradores de calhas em degraus.

### 5.3.1 Coeficiente $\beta$ medido e subpressão sob o jato $\Delta p$

A Figura 5.13 e a Tabela 5.6 apresentam o valor do coeficiente  $\beta$  medido nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  desta pesquisa. Conforme esperado,  $\beta$  apresentou relação proporcional ao número de Froude do escoamento  $Fr_0$  – por conta da velocidade do escoamento sobre o defletor, mais especificamente, que impacta diretamente na entrada de ar pelo sistema. Desse modo, considerando a mesma vazão de água sobre o modelo, a configuração  $D_{10}$  resultou em maiores coeficientes  $\beta$  do que a configuração  $D_1$ .

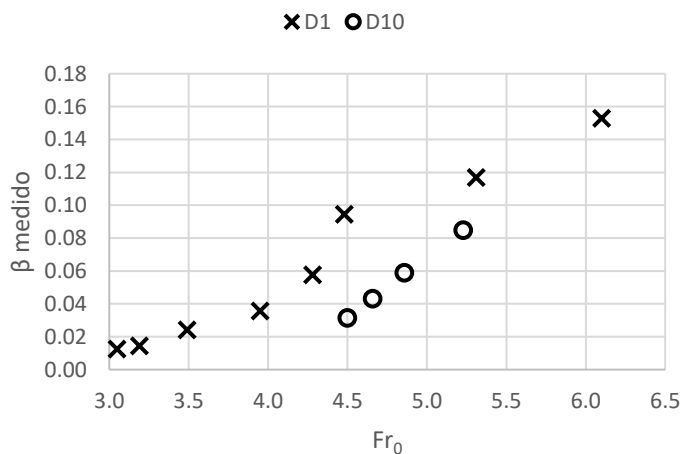


Figura 5.13 – Coeficiente  $\beta$  em função de  $Fr_0$ .

Tabela 5.6 – Coeficiente  $\beta$  medido nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ .

$q$ ( $m^2/s$ )	$\beta$ ( $D_1$ )	$\beta$ ( $D_{10}$ )
0,054	0,153	-
0,082	0,117	-
0,108	0,095	-
0,150	0,058	-
0,200	0,036	0,085
0,300	0,024	0,059
0,400	0,014	0,043
0,500	0,013	0,031

Como já mencionado no item 3.4.1, caso a subpressão sob o jato ( $\Delta p$ ) seja considerada relevante, a estimativa de  $\beta$  estará condicionada ao conhecimento de tal parâmetro. Pfister (2011) e Terrier (2016) indicam que o efeito da subpressão pode ser desprezado desde que o valor de  $\Delta p$  seja inferior a 10% da profundidade  $h_0$ .

A Figura 5.14 apresenta os valores das pressões médias ( $P_{med}$ ) medidas sobre as faces horizontais dos degraus nº2 ( $H_2$ ) e nº11 ( $H_{11}$ ), ambos situados imediatamente a jusante do defletor nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , respectivamente. Entende-se que o valor da pressão média sobre tais faces (medida por meio de transdutores de pressão) seja uma estimativa aceitável para o valor de  $\Delta p$ . Conforme pode ser observado na Figura 5.14, para todas as vazões ensaiadas,  $P_{med}$  na face  $H_2$  é muito próxima da pressão atmosférica (no caso,  $P_{med} = 0$ ). Para o caso de  $P_{med}$  na face  $H_{11}$ , os valores são ligeiramente negativos, mas ainda assim próximos da pressão atmosférica, em nenhum

caso menores de - 0,01 m (isto é,  $P_{med}/\gamma > - 0,01$  m sempre – nesse caso, em termos de altura de coluna piezométrica).

A Figura 5.15 exibe a razão entre o valor de  $\Delta p$  e a profundidade  $h_0$ , além do limite máximo indicado por Pfister (2011) para que o efeito da subpressão possa ser desprezado (como apresentado no item 3.4.1, dado por  $\Delta p/h_0 = 0,10$ ). Todas as situações ensaiadas na condição D<sub>1</sub> não excedem o valor sugerido por Pfister (2011), ao passo que dois casos da configuração D<sub>10</sub> estão acima, entretanto, ainda muito próximas do limite. Em função dos resultados da Figura 5.14 e da Figura 5.15, entende-se que o efeito da subpressão  $\Delta p$  nas condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub> possa ser desprezado. Desse modo, a contribuição de  $\Delta p$  não será considerada na equação de previsão do coeficiente  $\beta$ .

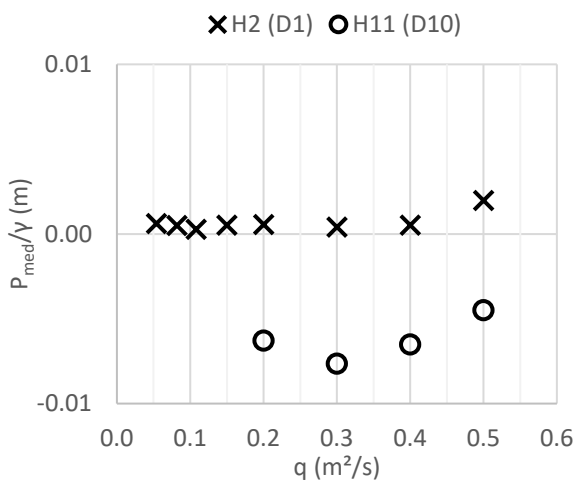


Figura 5.14 –  $P_{med}$  sobre as faces H<sub>2</sub> (configuração D<sub>1</sub>) e H<sub>11</sub> (configuração D<sub>10</sub>).

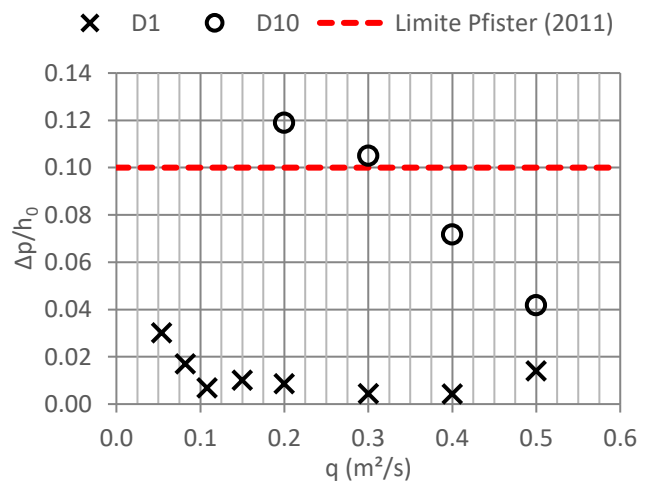


Figura 5.15 – Razão entre a subpressão sob o jato  $\Delta p$  e a profundidade  $h_0$ .

### 5.3.2 Avaliação do coeficiente $\beta$ com base na literatura

A despeito das incertezas associadas à estimativa do comprimento do jato  $L_j$ , autores como Pinto et al. (1982), Terrier (2016), entre outros, sugerem que o coeficiente  $\beta$  pode ser representado como uma função linear da relação entre  $L_j$  e a profundidade do escoamento sobre o defletor ( $h_0$ ), conforme já apresentado no item 3.4.1.

A Figura 5.16 apresenta os resultados de  $\beta$  medido nas situações D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, em função da relação  $L_j/h_0$ . Na Figura 5.16 também consta a reta proposta por Terrier (2016) para previsão de  $\beta$  (Equação 3.27, item 3.4.1). É possível reconhecer que o ajuste de Terrier (2016) é adequado na previsão de  $\beta$  na condição D<sub>1</sub>, no entanto, o mesmo não acontece para os dados obtidos na condição D<sub>10</sub>.

Esse fato sugere que outros parâmetros estão envolvidos no fenômeno e que a relação apenas entre  $\beta$  e  $L_j/h_0$  parece não o representar adequadamente. De qualquer modo, é justo indicar que, para condições similares a D<sub>1</sub> (isto é, para sistema aerador posicionado no início da calha em

degraus), a estimativa de  $\beta$  pela equação de Terrier (2016) em função de  $L_j/h_0$  (Equação 3.27) é uma alternativa conveniente (desde que  $L_j$  seja conhecido ou possa ser estimado com precisão adequada). No caso dos dados da condição D<sub>10</sub>, embora estes não se ajustem adequadamente com a proposta de Terrier (2016), há indícios da existência de uma relação linear entre  $L_j/h_0$  e o coeficiente  $\beta$ , a exemplo da condição D<sub>1</sub>, como sugere a Figura 5.16. Mais detalhes acerca da relação entre  $\beta$  e  $L_j/h_0$  serão apresentados posteriormente.

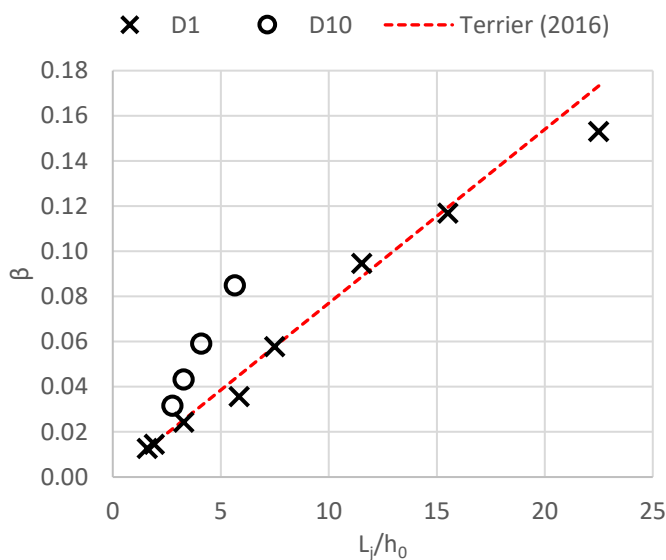


Figura 5.16 – Coeficiente  $\beta$  em função de  $L_j/h_0$ .

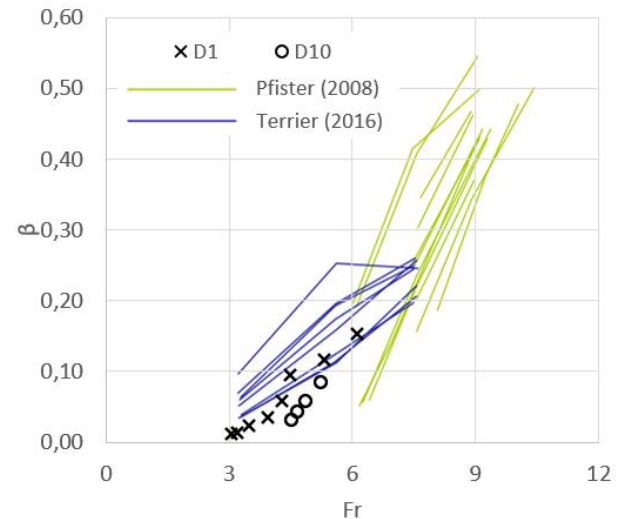


Figura 5.17 – Coeficiente  $\beta$  em função de  $Fr_0$  com resultados de Pfister (2008)<sup>61</sup> apud Terrier (2016) e Terrier (2016).

Embora a relação  $L_j/h_0$  seja utilizada no cálculo de  $\beta$ , a maior parte dos autores propõe equações de estimativa desse coeficiente em função do número de Froude do escoamento  $Fr_0$ . A Figura 5.17 apresenta  $\beta$  em função de  $Fr_0$ , considerando as condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub> do presente trabalho, bem como os dados de Pfister (2008) apud Terrier (2016) e de Terrier (2016). Conforme Figura 5.17, em geral, os dados da condição D<sub>1</sub> seguem a tendência dos de Terrier (2016), ao passo que os da condição D<sub>10</sub> parecem seguir o mesmo comportamento (mesma tendência de declividade) dos resultados obtidos por Pfister (2008) apud Terrier (2016), embora deslocados (uma vez que a faixa de  $Fr_0$  avaliada é distinta).

A Figura 5.18 contrapõe o coeficiente  $\beta$  medido nos ensaios deste trabalho, nas condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, com  $\beta$  estimado com base em autores mencionados no item 3.4.1. Nesse caso, todas as equações contempladas na Figura 5.18 consideram a estimativa de  $\beta$  com base em  $Fr_0$ . Ainda, vale destacar que o uso das equações foi condicionado apenas aos casos cujo número de Froude fosse compatível à faixa avaliada pelo respectivo autor (os intervalos de validade dos parâmetros avaliados por cada autor constam nas notas de rodapé da Tabela 3.6 e também no APÊNDICE E).

<sup>61</sup>Pfister, M. *Schussrinnenbelüfter Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur* (em alemão). In Minor, H. E., VAW Mitteilungen 203. ETH Zurich. 2008.

Na Figura 5.18, os resultados associados à condição  $D_1$  são as séries cujo ícone é uma cruz, ao passo que na condição  $D_{10}$  é um círculo, conforme legenda.

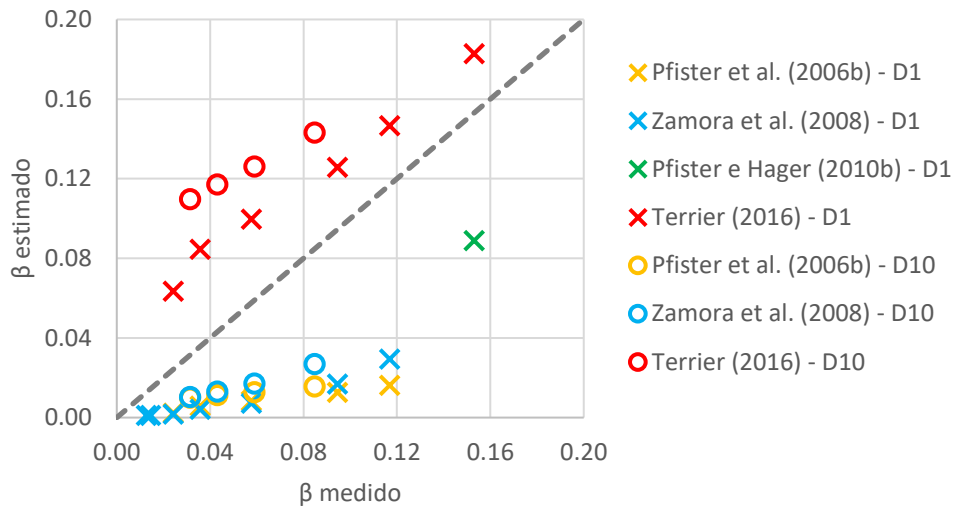


Figura 5.18 – Coeficiente  $\beta$  medido versus estimado em função de  $Fr_0$ , com base em autores selecionados, nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ .

Como indica a Figura 5.18, em suma, as equações testadas não são capazes de estimar adequadamente o coeficiente  $\beta$  medido nos ensaios, especialmente na condição  $D_{10}$ . A aplicação da equação de Terrier (2016) conduziria a resultados desfavoráveis à segurança (dado que  $\beta_{estimado} > \beta_{medido}$ ) em ambas as condições ( $D_1$  e  $D_{10}$ ). Esse comportamento pode ser ratificado avaliando-se também a Figura 5.17, uma vez que, para uma mesma faixa de  $Fr_0$ , os coeficientes  $\beta$  obtidos por Terrier (2016) são superiores aos medidos no presente trabalho. Já para todos os demais autores, o resultado seria favorável à segurança, mas ainda assim muito distinto do observado no modelo físico. Ressalta-se que foram considerados apenas casos enquadrados na faixa de  $Fr_0$  avaliada pelos respectivos autores – por isso, por exemplo, há apenas um resultado associado à equação de Pfister e Hager (2010b).

As comparações apresentadas indicam a necessidade de nova equação para estimativa do coeficiente  $\beta$ , que conduza a resultados próximos dos medidos no presente trabalho e que possa ser aplicada em sistemas aeradores posicionados em diferentes locais ao longo da calha.

### 5.3.3 Previsão do coeficiente $\beta$

Considerando os dados medidos nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , propõe-se a relação apresentada na Equação 5.7 ( $R^2 = 0,97$ ) para estimativa do coeficiente  $\beta$ . A equação é do tipo exponencial, função de  $Fr_0$  (que aparece desmembrado na referida equação), de características geométricas do sistema aerador, entre outros parâmetros. A Equação 5.7 foi também proposta pela autora e colaboradores, na referência Ferla et al. (2021), onde foram explorados resultados preliminares associados ao presente trabalho.

$$\beta = 0,196 e^{-1,106 \Psi} \text{ onde } \Psi = 0,16 \frac{h_0^{3/2} V_0}{Z_0 t} \quad \text{Equação 5.7}$$

onde (ver Figura 4.3)

$h_0$  é a profundidade do escoamento sobre o defletor [m], podendo ser estimada teoricamente, de acordo com a equação de energia ou por Meireles et al. (2012), como mencionado no item 5.1.1;

$V_0$  é a velocidade média do escoamento imediatamente a montante do defletor [m/s];

$Z_0$  é o parâmetro associado à energia do escoamento imediatamente a montante do dispositivo aerador, a contar da linha de energia crítica [m];

$t$  é a altura do defletor [m].

Obs.: para validade da Equação 5.7, as unidades informadas devem ser respeitadas.

A Figura 5.19 apresenta  $\beta$  em função do parâmetro  $\Psi$  dado pela Equação 5.7, juntamente com os pontos representados pelos dados medidos. É possível identificar que a Equação 5.7 é capaz de estimar adequadamente o coeficiente  $\beta$  associado tanto à condição  $D_1$  quanto à  $D_{10}$ . Na Figura 5.19 também estão indicadas as curvas associadas à consideração das incertezas na estimativa de  $\beta$  (conforme legenda,  $\beta_{\text{incertezas}}$ ), como será mais explorado a seguir. Vale ressaltar que, conforme item 5.1.2, é possível que os ensaios da condição  $D_1$  com  $q < 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  estejam submetidos a efeitos de escala não desprezáveis. Contudo, esses dados foram mantidos na análise, visto que os resultados obtidos nesses casos apresentaram a mesma tendência que os demais no ajuste de  $\beta$ .

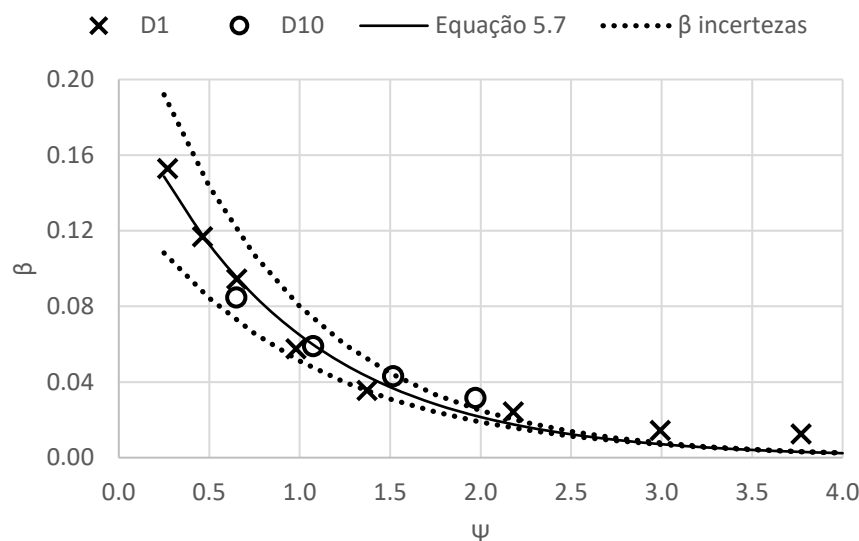


Figura 5.19 – Coeficiente de entrada de ar  $\beta$  em função do parâmetro  $\Psi$ .

A Equação 5.7 é resultado da combinação de alguns dos principais parâmetros adimensionais explorados na literatura (apresentados no item 3.4.1). A Equação 5.8 apresenta  $\Psi$  em sua forma mais primitiva, onde é possível identificar as relações adimensionais que deram origem à expressão.

$$\Psi = \frac{h_0 V_0^2}{Z_0 t Fr_0 2g} \quad \text{Equação 5.8}$$

Terrier (2016) mencionou que, para os dados avaliados em sua pesquisa, a razão  $t/h_0$  não apresentou melhora significativa na previsão de  $\beta$ , contudo, no caso do presente trabalho, esta relação foi contemplada, estando associada à geometria do aerador e à vazão escoada. Ademais,

além da consideração do número de Froude  $Fr_0$ , também estão contemplados  $V_0$  e  $Z_0$ , parâmetros relacionados à posição do sistema aerador ao longo da calha e que representam a energia do escoamento (tanto cinética quanto potencial) na região. De certa forma, pode-se sugerir ainda que a razão  $(V_0^2/2g)/Z_0$  traduza fisicamente o desenvolvimento da camada limite turbulenta até o ponto onde está localizado o aerador. Por contemplar parâmetros associados ao posicionamento do aerador no vertedouro, entende-se que a Equação 5.7 pode ser aplicada independentemente do local onde está instalado este sistema na estrutura. Ainda, no caso da Equação 5.8, não foram contemplados parâmetros em função do comprimento do jato  $L_j$  na expressão. Relações lineares capazes de prever o coeficiente  $\beta$  e que levam com conta  $L_j$ , a exemplo de outros autores, são abordadas no APÊNDICE F.

Ressalta-se, ainda, que a Equação 5.7 não considera a subpressão sob o jato  $\Delta p$ , uma vez que esta não foi representativa nos ensaios, como discutido no item 5.3.1.

As principais incertezas de natureza experimental que podem estar associadas ao estabelecimento da Equação 5.7 dizem respeito à medição de  $h_0$  e  $\beta$ . No caso da profundidade  $h_0$ , a incerteza está relacionada à oscilação da superfície livre do escoamento, porém, visto que neste trabalho optou-se por utilizar a profundidade  $h_0$  calculada (e não a medida, como reportado no item 5.1.1), tal oscilação não interfere nos resultados. De qualquer forma, em instalações experimentais, as oscilações da superfície livre podem ser minimizadas com a inserção de elementos que garantam a distribuição homogênea do escoamento. No caso do modelo utilizado neste trabalho, tais oscilações conduziram a variações máximas de cerca de 8% na profundidade  $h_0$  (o que, considerando a maior vazão escoada, representa menos de 1 cm na profundidade), refletindo em diferenças da ordem de 5% em  $\Psi$ , que podem ser consideradas irrelevantes nos resultados associados ao parâmetro  $\beta$ .

Já as incertezas relacionadas à medição de  $\beta$  referem-se à exatidão do instrumento utilizado na medição da velocidade do ar (isto é, da sonda Pitot-Prandtl acoplada ao transmissor diferencial de pressão, como exposto no item 4.3.1). A Figura 5.19 apresenta as curvas envoltórias (representadas por  $\beta_{\text{incertezas}}$  na legenda) que consideram ajustes no coeficiente  $\beta$  tendo em conta os erros do transmissor diferencial de pressão utilizado (ver Tabela 4.3). Desse modo, como sugere a Figura 5.19, casos onde o coeficiente  $\beta$  estimado pela Equação 5.7 excede o valor de 0,10 devem ser avaliados com cautela, pois as incertezas associadas ao instrumento de medição são consideráveis nessa região (da ordem de 30%).

Por fim, de forma similar ao apresentado na Figura 5.18, a Figura 5.20 confronta o coeficiente  $\beta$  medido e estimado pela Equação 5.7, juntamente com os resultados obtidos pela aplicação das equações de outros autores avaliados – nesse caso, todas em função de  $Fr_0$ . Nesta figura também



estão inseridas as faixas de resultados que estariam associadas às incertezas na estimativa de  $\beta$  –  $\beta_{\text{incertezas}}$ , conforme legenda – pelo uso da Equação 5.7.

Deve-se atentar que a aplicação bem sucedida da Equação 5.7 tem de estar preferencialmente limitada a casos similares aos aqui avaliados, isto é, calhas inclinadas com ângulo  $\alpha = 53,13^\circ$ ,  $3 \leq Fr_0 \leq 6$ ,  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,50$  e defletor com ângulo  $\theta = 7,6^\circ$ .

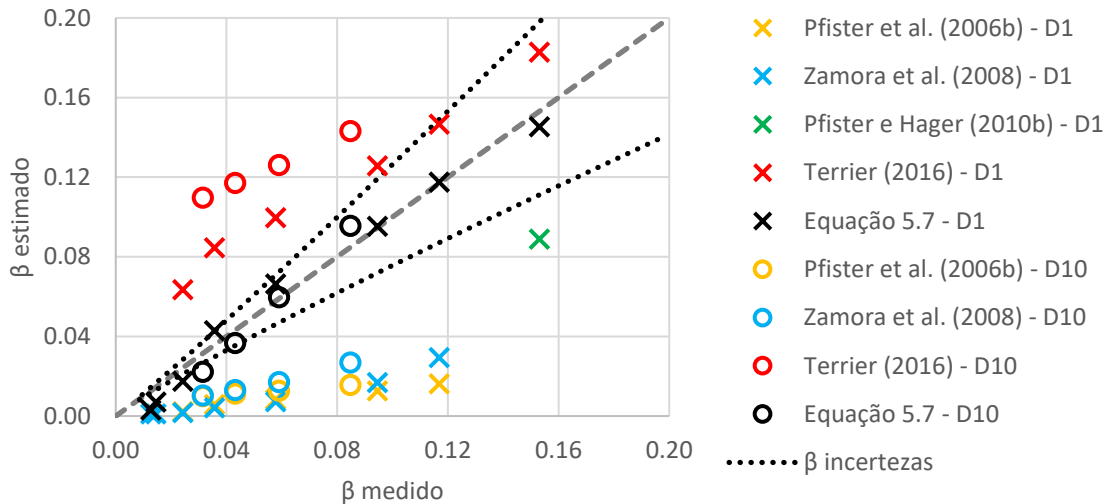


Figura 5.20 – Coeficiente  $\beta$  medido *versus* estimado, com base em autores selecionados e na Equação 5.7.

Na aplicação da Equação 5.7, podem ser enquadradas tanto situações que considerem o sistema aerador posicionado nas proximidades da ogiva do vertedouro (condição compatível ao caso D<sub>1</sub> aqui avaliado), quanto em porções mais a jusante (condição D<sub>10</sub>). Ainda, destaca-se que, uma vez que a Equação 5.7 considera parâmetros relativos ao escoamento no local do sistema aerador ( $h_0, V_0$  e  $Z_0$ ), admite-se que seu uso seja adequado para situações onde o sistema esteja posicionado em qualquer ponto ao longo da calha – isto é, em porções intermediárias aos degraus de nº1 e nº10, ou, até mesmo, a jusante do degrau de nº10. Todavia, como também já destacado no item 5.2.1, para validação desta hipótese, é necessário aplicar a Equação 5.7 também nesses casos – em comparação com respectivos dados medidos.

Uma vez que a Equação 5.7 não considera a altura do degrau  $h_d$ , parece intuitivo que esta não pode ser utilizada para razões  $h_d/h_0$  diferentes das aqui avaliadas (isto é  $0,40 \leq h_d/h_0 \leq 3,00$ ). Porém, a análise envolvendo a relação  $h_d/h_0$  não resultou em melhoria na equação de previsão do coeficiente  $\beta$  (ver APÊNDICE G). Ademais, o mesmo comportamento foi reportado também por Terrier (2016), como já mencionado no item 3.4.1. Sendo assim, admite-se que a Equação 5.7 conduz a estimativas aceitáveis de  $\beta$  mesmo quando a razão  $h_d/h_0$  não obedece aos limites do presente trabalho (desde que resguardados os demais limites de validade).

A análise de comportamento da equação de previsão do coeficiente  $\beta$  proposta neste trabalho (Equação 5.7) com dados experimentais coletados em outros modelos físicos (que não os que deram origem à equação) consta no APÊNDICE F.

## 5.4 PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS PRESSÕES NOS DEGRAUS

Este item aborda a análise da distribuição longitudinal das pressões sobre a calha. Os valores de pressões medidas nas situações de aeração induzida com sistema aerador instalado tanto no degrau nº1 ( $D_1$ ) quanto no degrau nº10 ( $D_{10}$ ) foram comparados com os dados obtidos na condição de aeração natural (NAT), para a faixa de vazões específicas  $q$  entre 0,20 e 0,50  $m^2/s$  (ver Tabela 4.2). Como mencionado no Capítulo 4, os dados das configurações NAT e  $D_1$  são provenientes de parte das contribuições de Canellas (2020), Novakoski (2021), Matos et al. (2022), dentre outros, e foram inseridos na análise de modo a servirem como referência às comparações. Neste item, o comportamento das pressões foi avaliado com base nos resultados dos parâmetros estatísticos associados à pressão média ( $P_{med}$ ), ao desvio padrão de pressões ( $P_\sigma$ ) e às pressões extremas, nas faces vertical e horizontal dos degraus. As pressões extremas mínimas e máximas avaliadas nesse item correspondem às probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9% ( $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ), respectivamente, tendo sido estas as selecionadas por representarem os resultados mais críticos (dentre os parâmetros estatísticos aqui avaliados).

Neste item, é dada ênfase aos principais resultados e conclusões associados aos parâmetros estatísticos mencionados, estando apenas alguns dos principais gráficos aqui expostos. Os resultados na íntegra aparecem no APÊNDICE H.

A Figura 5.21 apresenta  $P_{med}$ , representada em termos de altura de coluna piezométrica (m), nas faces horizontais dos degraus, para as condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , considerando a vazão específica  $q = 0,20 m^2/s$ . O eixo das abscissas corresponde ao número do degrau na calha. A Figura 5.21 também indica o local de início de aeração incipiente no escoamento na condição NAT – identificado como “Aeração incipiente (NAT)” na legenda. Além disso, na legenda também estão informados os valores do coeficiente  $\beta$  medido nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Entre os degraus de nº1 e nº10, o escoamento na condição  $D_{10}$  é semelhante à condição NAT. Sendo assim, nessa região, os resultados da condição  $D_{10}$  foram considerados iguais aos da condição NAT (conforme indicado no APÊNDICE D).

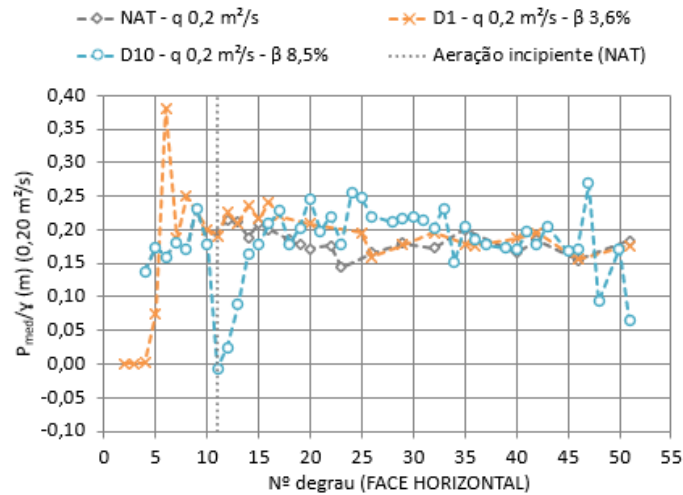


Figura 5.21 – Comportamento do parâmetro  $P_{med}$ , na face horizontal do degrau, para  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Pela Figura 5.21 é possível identificar as regiões em que, nas condições de aeração induzida, ocorre o lançamento do jato sobre os degraus. Tais regiões são representadas pelos valores de  $P_{med}$  próximos de zero nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  (dado que o escoamento não está em contato com os degraus, ocorrendo, na região, resultados próximos à pressão atmosférica). Além dessas, outra região que pode ser claramente identificada pela análise de  $P_{med}$  fica junto ao ponto de impacto do jato nos degraus, na condição  $D_1$ , representado pelo pico de valor no degrau nº6. Esse pico, porém, não é observado no ponto de impacto do jato na condição  $D_{10}$  (que é o degrau nº14). Tal distinção entre os valores de  $P_{med}$  no impacto do jato entre as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  pode estar relacionada com as diferenças identificadas no aspecto visual do jato (como já apresentado e discutido no item 5.2, na Figura 5.6): na condição  $D_1$ , o jato é íntegro e formado quase que exclusivamente por água, já na condição  $D_{10}$  o jato é composto em grande parte pela mistura ar-água.

De forma semelhante ao indicado para o parâmetro  $P_{med}$ , a Figura 5.22 apresenta  $P_{0,1\%}$  nas faces verticais dos degraus, nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , considerando as vazões específicas  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.22a) e  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 5.22b).

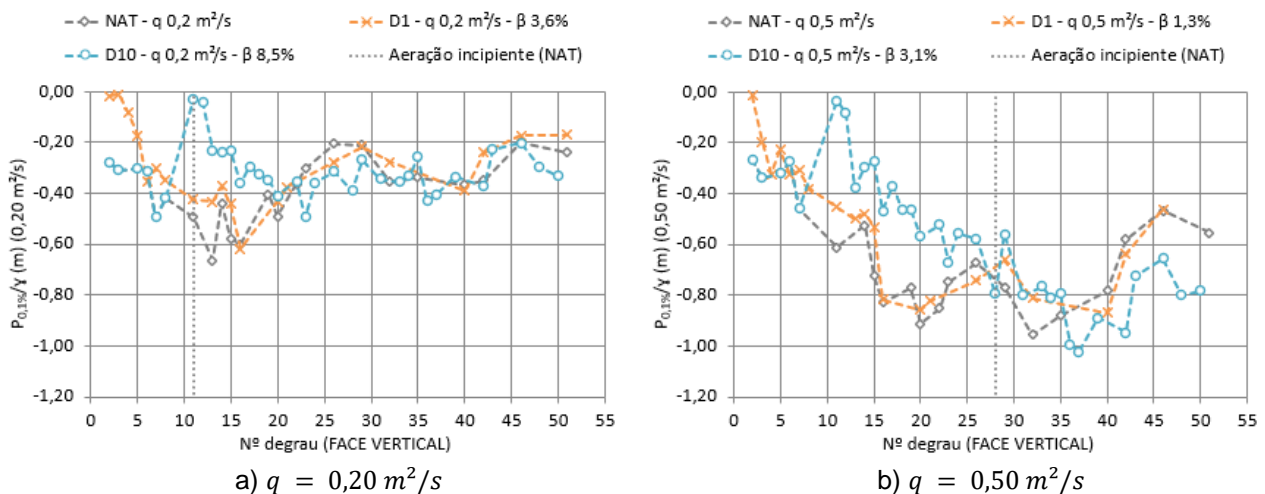


Figura 5.22 – Comportamento do parâmetro  $P_{0,1\%}$  na face vertical dos degraus para a)  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  e b)  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

De acordo com a Figura 5.22a, o comportamento de  $P_{0,1\%}$  na condição  $D_1$  é muito semelhante à condição NAT, com exceção da região nas proximidades do lançamento e impacto do jato (entre os degraus nº0 e nº5, aproximadamente). Na sequência, entre os degraus nº5 e nº15, tem-se uma região de transição entre os valores de  $D_1$  e NAT e, finalmente, a partir do degrau nº15, pode-se dizer que as condições  $D_1$  e NAT apresentam os mesmos valores. A condição  $D_{10}$  apresenta escoamento sujeito à aeração natural (e, portanto, igual à condição NAT) até o degrau nº10, seguido do lançamento e impacto do jato. A região de transição entre o comportamento da condição  $D_{10}$  e NAT ocorre entre os degraus nº13 e nº20, aproximadamente. Comportamento semelhante é observado na Figura 5.22b, com região de transição entre  $D_1$  e NAT entre os degraus nº5 e nº15, e entre  $D_{10}$  e NAT nos degraus nº13 a nº25, aproximadamente.

Ou seja, com base na Figura 5.22 é possível observar que o parâmetro  $P_{0,1\%}$  na condição  $D_1$  assume valores muito próximos aos da condição NAT já nas proximidades do impacto do jato nos degraus. Por outro lado, na condição  $D_{10}$  há uma região de transição maior desde o impacto do jato até o “encontro” com a condição NAT. Nessa região de transição, inclusive, o valor medido de  $P_{0,1\%}$  é maior (menos negativo) na condição  $D_{10}$ , quando comparado aos valores medidos nas demais condições ( $D_1$  e NAT), o que sugere que houve a amenização das pressões na condição  $D_{10}$  frente às demais. É possível que essa diferença tenha relação com a maior incorporação de ar na condição  $D_{10}$  (visto que há mais entrada de ar pelo aerador nesse caso, do que na condição  $D_1$ ), que contribui também com o aspecto do escoamento nessa condição (que é bifásico quase na totalidade da profundidade a partir do impacto do jato, ver Figura 5.6).

De acordo com a Figura 5.22a, considerando a condição NAT, o início de aeração natural (incipiente) acontece aproximadamente no degrau nº11. A montante desse ponto, o escoamento é monofásico, formado apenas por água (sem bolhas de ar aparentes), sendo assim, a estrutura do vertedouro pode estar suscetível a danos em decorrência da cavitação (desde que se cumpram as demais condicionantes, associadas à redução da pressão, para que o fenômeno ocorra). Na Figura 5.22b a situação é ainda mais crítica: o início de aeração natural no escoamento ocorre apenas no degrau nº28, expondo boa parte da calha à possibilidade de danos (para a condição NAT).

Os valores mínimos de  $P_{0,1\%}$  na condição NAT atingem a ordem de -0,60 a -1,00 m (em modelo físico), o que corresponderia, em protótipo, a valores de -6,00 a -10,00 m (se considerada a escala geométrica de 1:10, entre modelo e protótipo) ou -9,00 a -15,00 m (escala 1:15)<sup>62</sup>. Embora nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  tenham sido atingidos valores mínimos semelhantes aos da condição NAT, na aeração induzida o escoamento passa a ser composto por uma mistura de ar e água já nas

---

<sup>62</sup> Tais valores de pressão parecem indicar a possibilidade da ocorrência de cavitação no protótipo, de modo que não haveria presença de água (no estado líquido) na região. Valores de pressão abaixo da pressão de vapor (isto é,  $P < -10$  m, aproximadamente, em termos de coluna piezométrica e de pressão relativa) devem ser entendidos unicamente como indicativos de que a região poderá estar exposta ao fenômeno da cavitação, não correspondendo à pressão que ocorreria na realidade.

proximidades do impacto do jato, o que ocorre a montante do degrau nº15 em todas as situações de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ) da Figura 5.22. A partir desse ponto o escoamento é aerado e, desse modo, a possibilidade de ocorrência de danos na calha é menor.

Neste item apresentou-se apenas um breve resumo dos principais resultados obtidos, traduzidos pelos parâmetros estatísticos  $P_{med}$  e  $P_{0,1\%}$ . Os resultados completos constam no APÊNDICE H.

## 5.5 PREVISÃO DA DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES AO LONGO DA CALHA

Com relação à avaliação das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus da calha, foram explorados, no item anterior, os resultados “brutos”, isto é, relacionados aos dados adquiridos nos ensaios, nas diferentes vazões testadas. De modo a caracterizar o comportamento das pressões sem a dependência da vazão do escoamento, nesse item são propostas adimensionalizações aos dados adquiridos, com o intuito de propor uma metodologia para previsão da distribuição das pressões ao longo da calha.

São avaliados os dados obtidos na faixa  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , do mesmo modo como no item 5.4 (ver, também, Tabela 4.2), nas faces verticais e horizontais dos degraus, no sentido longitudinal ao escoamento (ao longo dos degraus da calha), nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Foram exploradas equações de previsão abrangendo a distribuição das pressões médias ( $P_{med}$ ) e do desvio padrão das pressões ( $P_\sigma$ ), tanto na face vertical quanto horizontal. Com relação às pressões extremas, foram propostas equações de previsão considerando os valores mínimos na face vertical ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ) e máximos na face horizontal do degrau ( $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ), em conformidade com os critérios indicados no Capítulo 4 e também com os resultados expostos no item 5.4.

A análise dos parâmetros estatísticos indicou que o comportamento da distribuição longitudinal das pressões é bem representado pela Equação 5.9 ( $\Omega$ , eixo das ordenadas), juntamente com o adimensional de posição dado pela razão  $(L - L_j)/h_c$  (eixo das abscissas), traduzido pelo parâmetro  $L'$  (Equação 5.10). O adimensional  $\Omega$  foi também proposto pela autora e colaboradores, na referência Ferla et al. (2021), onde foram explorados resultados preliminares deste trabalho. O adimensional de posição  $L'$  é comumente utilizado quando da avaliação de escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração natural, tendo sido já utilizado por Matos (1999), Amador (2005), entre outros. Enquanto no caso de escoamentos com aeração natural é considerado o comprimento de aeração  $L_a$ , na aeração induzida este é substituído pelo comprimento do jato  $L_j$ .

$$\Omega = \frac{P}{\rho_w g} h_d \frac{h_c}{Z^3} Fr_0^2 \quad \text{Equação 5.9}$$

$$L' = \frac{(L - L_j)}{h_c} \quad \text{Equação 5.10}$$

Com relação aos parâmetros das referidas equações, vale o disposto na Figura 4.3. Desse modo, o número de Froude  $Fr_0$  está associado à entrada do defletor (considerando a profundidade do escoamento  $h_0$  estimada por modelo proposto por Meireles et al. (2012), conforme indicado no item 5.1.1) e o parâmetro  $Z$  está associado à energia do escoamento a contar da crista do vertedouro (seção correspondente à energia crítica). Assim, enquanto  $Fr_0$  traduz a importância da localização do aerador, o parâmetro  $Z$  representa a energia potencial do escoamento em cada degrau avaliado. Os demais parâmetros inseridos na Equação 5.9, como  $h_d$  e  $h_c$ , têm relação com a geometria da calha e com a vazão escoada, respectivamente, sendo usualmente empregados em casos semelhantes a este.

Com relação ao comprimento do jato  $L_j$ , na construção do modelo de previsão considerou-se o valor medido nos ensaios. Porém, quando da utilização da Equação 5.10, nos casos em que não se conhece o valor medido, podem ser utilizadas equações para sua estimativa. Como exemplo tem-se as equações estabelecidas no item 5.2.1, ou aquelas propostas por outros pesquisadores (abordadas no item 3.4.2).

Com base na adimensionalização proposta, os resultados obtidos e o comportamento dos dados estão representados na Figura 5.23 (face vertical dos degraus) e Figura 5.24 (face horizontal dos degraus). Nas referidas figuras também estão representadas curvas de ajuste aos dados adimensionalizados, que serão abordadas na sequência.

No caso da face vertical dos degraus (Figura 5.23), é possível identificar maior dispersão entre os dados das diferentes vazões nas regiões mais próximas ao ponto de impacto do jato (aproximadamente no intervalo  $0 \leq L' \leq 4$ ). Esse comportamento é mais expressivo quando avaliada a situação  $D_1$ , embora também seja aparente na situação  $D_{10}$  (porém, de forma muito mais sutil nesse caso). O mesmo comportamento também foi observado na face horizontal dos degraus (Figura 5.24). É razoável assumir que tais diferenças entre as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  estejam relacionadas ao aspecto do escoamento nas proximidades do ponto de impacto do jato nos degraus (como reportado no item 5.2).

Os dados adimensionalizados foram incorporados no programa para análise de dados *CurveExpert*, que permitiu avaliar dezenas de modelos de regressão com o intuito de estabelecer uma equação de ajuste aos valores adquiridos (resultados da adimensionalização dos dados). A escolha do modelo representativo do comportamento se deu com base, entre outros aspectos, no coeficiente de determinação ( $R^2$ ) das equações de regressão sugeridas pelo programa. Após a avaliação dos resultados, foram adotados dois modelos distintos, a depender da face do degrau, sendo:

- i. Face vertical do degrau: nesse caso, a equação que se mostrou mais representativa foi a do modelo sigmoide, caracterizado pela Equação 5.11. Este modelo foi também o adotado por Amador et al. (2009), quando da avaliação do coeficiente de pressão ( $C_p$ ),

a jusante do ponto de início de aeração, em escoamentos sobre vertedouros em degraus submetidos à aeração natural;

- ii. Face horizontal do degrau: no caso dos resultados adimensionalizados para a face horizontal do degrau, o modelo sigmoide não se mostrou o mais adequado na representação dos dados. Nesse caso, adotou-se o modelo racional, exposto na Equação 5.12.

$$\Omega_{face\ vertical} = \frac{a}{1 + be^{cL'}} \quad \text{Equação 5.11}$$

$$\Omega_{face\ horizontal} = \frac{a + bL'}{1 + cL' + dL'^2} \quad \text{Equação 5.12}$$

onde

a, b, c e d são constantes.

Importante mencionar que os modelos adotados não resultaram, necessariamente, para todos os parâmetros estatísticos avaliados ( $P_{med}$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$ ,  $P_{5\%}$ ,  $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ), no maior coeficiente  $R^2$ . A adoção de cada modelo se deu após análise conjunta dos resultados obtidos (para todos os parâmetros estatísticos), além disso, a simplicidade da equação e o número de constantes também foram características mandatórias à tomada de decisão.

As curvas resultantes das equações de ajuste sugeridas constam também na Figura 5.23 (face vertical do degrau) e na Figura 5.24 (face horizontal). Tendo em vista as diferentes condições de posicionamento do sistema aerador exploradas neste trabalho ( $D_1$  e  $D_{10}$ ), foram propostas equações de ajuste subdivididas da seguinte forma:

- i. Condições  $D_1$  e  $D_{10}$ : nesse caso, as equações de ajuste propostas englobam os dados completos, considerando as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  em conjunto;
- ii. Condição  $D_1$ : caso em que foram considerados apenas os dados da condição  $D_1$  na proposta das equações de ajuste (desconsideraram-se os dados da condição  $D_{10}$ );
- iii. Condição  $D_{10}$ : caso em que foram considerados apenas os dados da condição  $D_{10}$  na proposta das equações de ajuste (desconsideraram-se os dados da condição  $D_1$ ).

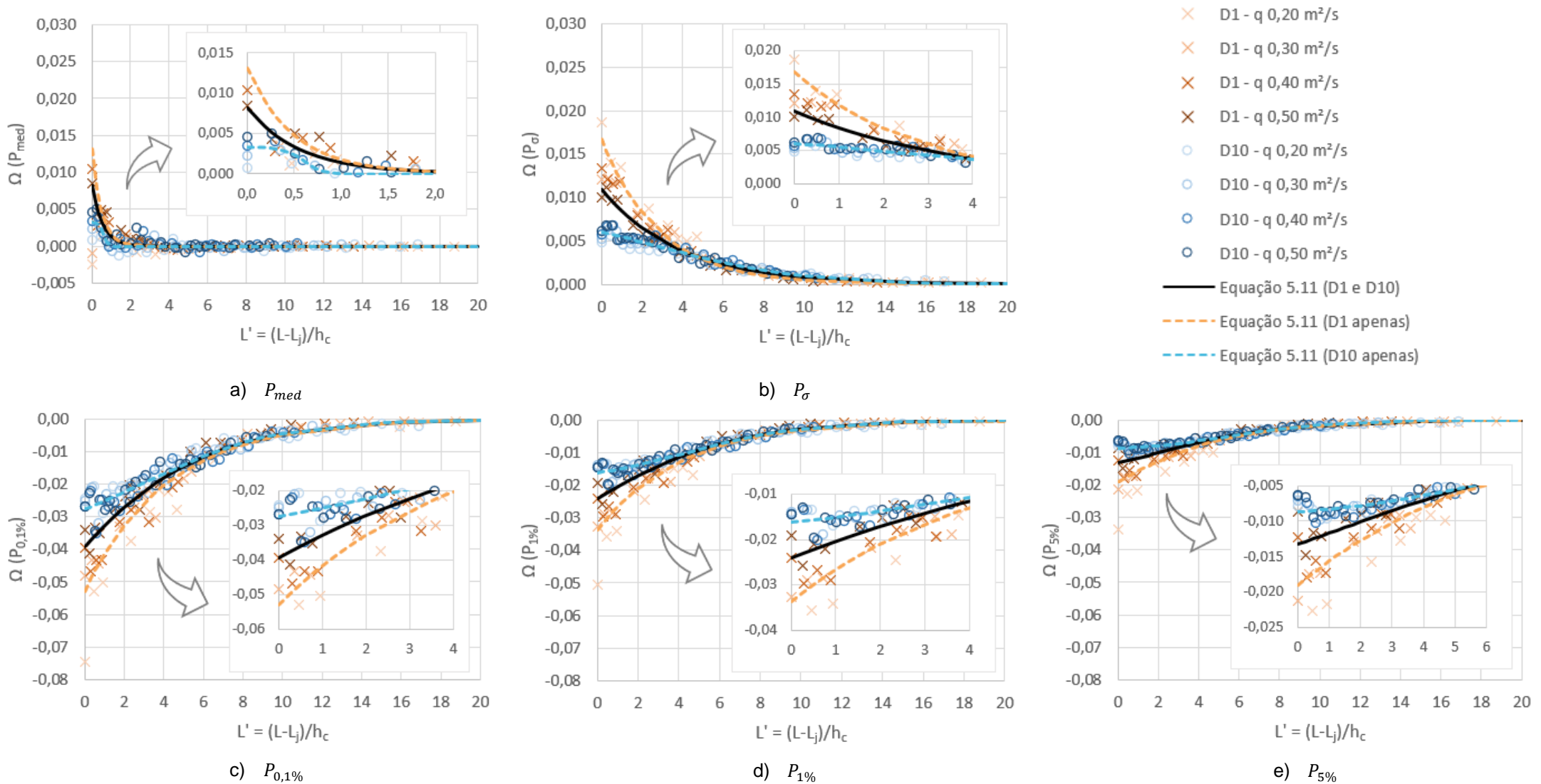
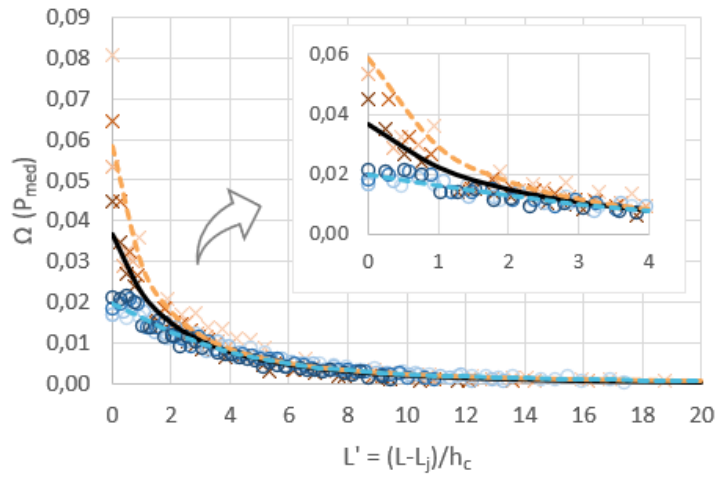
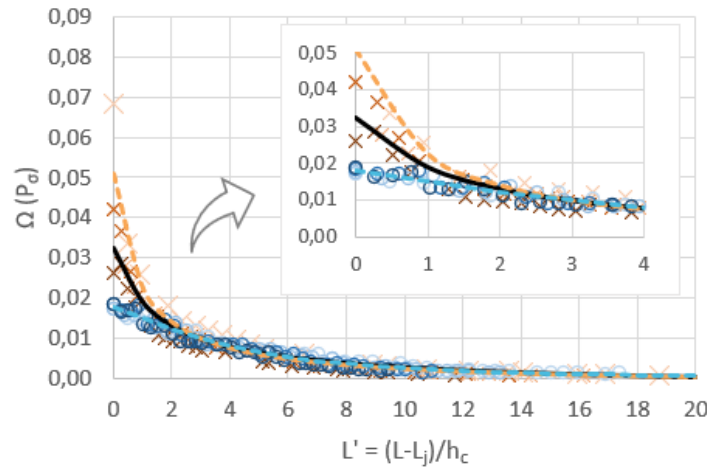


Figura 5.23 – Representação das pressões nas faces verticais dos degraus, adimensionalizadas com base na Equação 5.9 (eixo das ordenadas) e na Equação 5.10 (adimensional de posição, eixo das abscissas).

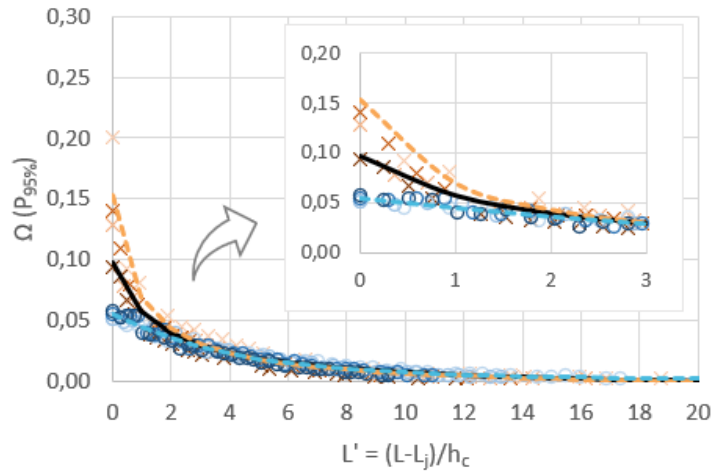




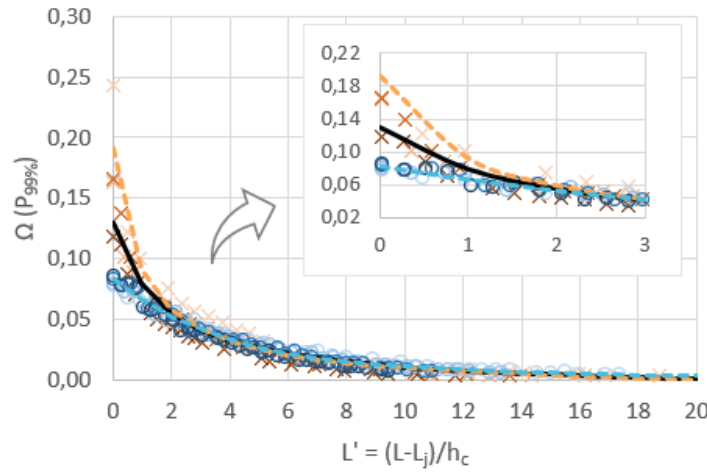
a)  $P_{med}$



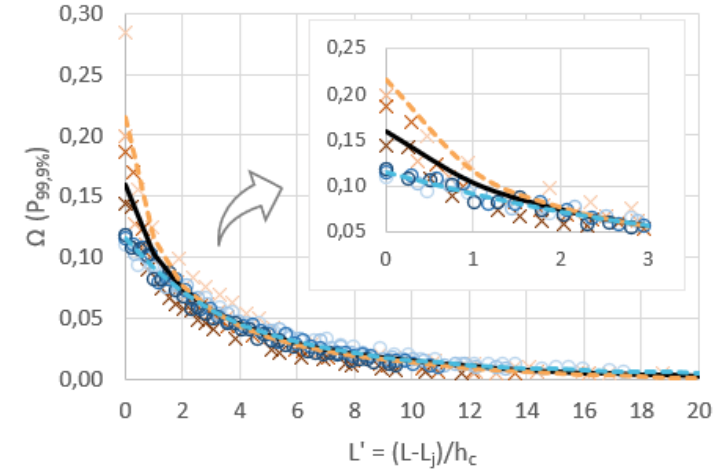
b)  $P_{\sigma}$



c)  $P_{95\%}$



d)  $P_{99\%}$



e)  $P_{99.9\%}$

- × D1 - q 0,20 m<sup>2</sup>/s
- × D1 - q 0,30 m<sup>2</sup>/s
- × D1 - q 0,40 m<sup>2</sup>/s
- × D1 - q 0,50 m<sup>2</sup>/s
- D10 - q 0,20 m<sup>2</sup>/s
- D10 - q 0,30 m<sup>2</sup>/s
- D10 - q 0,40 m<sup>2</sup>/s
- D10 - q 0,50 m<sup>2</sup>/s
- Equação 5.12 (D1 e D10)
- - - Equação 5.12 (D1 apenas)
- - - Equação 5.12 (D10 apenas)

Figura 5.24 – Representação das pressões nas faces horizontais dos degraus, adimensionalizadas com base na Equação 5.9 (eixo das ordenadas) e na Equação 5.10 (adimensional de posição, eixo das abscissas).

Os valores atribuídos às constantes da Equação 5.11 e da Equação 5.12, juntamente com os valores do coeficiente  $R^2$ , estão apresentados na Tabela 5.7 e Tabela 5.8, respectivamente.

Tabela 5.7 – Coeficientes da Equação 5.11 (face vertical do degrau).

Condições $D_1$ e $D_{10}$ (em conjunto)					
	$P_{med}$	$P_{\sigma}$	$P_{0,1\%}$	$P_{1\%}$	$P_{5\%}$
a	$1,88 \times 10^3$	$2,31 \times 10^4$	$-1,45 \times 10^{-1}$	$-6,29 \times 10^{-2}$	$-2,17 \times 10^{-2}$
b	$2,30 \times 10^5$	$2,11 \times 10^6$	2,70	1,61	$6,35 \times 10^{-1}$
c	1,81	$2,61 \times 10^{-1}$	$2,40 \times 10^{-1}$	$2,55 \times 10^{-1}$	$2,96 \times 10^{-1}$
$R^2$	0,45	0,67	0,78	0,73	0,66
Condição $D_1$ (de forma isolada)					
	$P_{med}$	$P_{\sigma}$	$P_{0,1\%}$	$P_{1\%}$	$P_{5\%}$
a	$1,70 \times 10^4$	$9,34 \times 10^4$	$-2,00 \times 10^4$	-1,07	$-5,43 \times 10^{-2}$
b	$2,19 \times 10^6$	$5,58 \times 10^6$	$3,79 \times 10^5$	30,58	1,86
c	2,04	$3,49 \times 10^{-1}$	$2,38 \times 10^{-1}$	$2,43 \times 10^{-1}$	$2,84 \times 10^{-1}$
$R^2$	0,61	0,90	0,91	0,88	0,81
Condição $D_{10}$ (de forma isolada)					
	$P_{med}$	$P_{\sigma}$	$P_{0,1\%}$	$P_{1\%}$	$P_{5\%}$
a	$3,25 \times 10^{-3}$	$8,52 \times 10^{-3}$	$-3,82 \times 10^{-2}$	$-1,97 \times 10^{-2}$	$-9,58 \times 10^{-3}$
b	$2,73 \times 10^{-3}$	$4,08 \times 10^{-1}$	$3,85 \times 10^{-1}$	$2,21 \times 10^{-1}$	$1,02 \times 10^{-1}$
c	9,94	$2,94 \times 10^{-1}$	$2,99 \times 10^{-1}$	$3,36 \times 10^{-1}$	$3,96 \times 10^{-1}$
$R^2$	0,63	0,95	0,91	0,93	0,93

Tabela 5.8 – Coeficientes da Equação 5.12 (face horizontal do degrau).

Condições $D_1$ e $D_{10}$ (em conjunto)					
	$P_{med}$	$P_{\sigma}$	$P_{95\%}$	$P_{99\%}$	$P_{99,9\%}$
a	$3,68 \times 10^{-2}$	$3,22 \times 10^{-2}$	$9,77 \times 10^{-2}$	$1,30 \times 10^{-1}$	$1,59 \times 10^{-1}$
b	$-8,32 \times 10^{-4}$	$-1,50 \times 10^{-3}$	$-4,54 \times 10^{-3}$	$-5,94 \times 10^{-3}$	$-6,32 \times 10^{-3}$
c	$5,41 \times 10^{-1}$	$6,37 \times 10^{-1}$	$6,18 \times 10^{-1}$	$5,69 \times 10^{-1}$	$4,74 \times 10^{-1}$
d	$6,27 \times 10^{-2}$	$-7,09 \times 10^{-3}$	$1,11 \times 10^{-3}$	$-1,50 \times 10^{-3}$	$6,92 \times 10^{-3}$
$R^2$	0,70	0,76	0,77	0,83	0,88
Condição $D_1$ (de forma isolada)					
	$P_{med}$	$P_{\sigma}$	$P_{95\%}$	$P_{99\%}$	$P_{99,9\%}$
a	$5,84 \times 10^{-2}$	$5,10 \times 10^{-2}$	$1,53 \times 10^{-1}$	$1,92 \times 10^{-1}$	$2,15 \times 10^{-1}$
b	$-7,93 \times 10^{-4}$	$-2,30 \times 10^{-3}$	$-7,55 \times 10^{-3}$	$-9,62 \times 10^{-3}$	$-1,02 \times 10^{-2}$
c	$8,50 \times 10^{-1}$	1,16	1,09	1,01	$7,79 \times 10^{-1}$
d	$1,34 \times 10^{-1}$	$-1,58 \times 10^{-3}$	$1,70 \times 10^{-4}$	$-1,59 \times 10^{-2}$	$-4,01 \times 10^{-3}$
$R^2$	0,87	0,93	0,93	0,94	0,93
Condição $D_{10}$ (de forma isolada)					
	$P_{med}$	$P_{\sigma}$	$P_{95\%}$	$P_{99\%}$	$P_{99,9\%}$
a	$1,95 \times 10^{-2}$	$1,79 \times 10^{-2}$	$5,51 \times 10^{-2}$	$8,29 \times 10^{-2}$	$1,15 \times 10^{-1}$
b	$2,68 \times 10^{-4}$	$-3,05 \times 10^{-4}$	$-7,95 \times 10^{-4}$	$-7,19 \times 10^{-4}$	$-4,96 \times 10^{-6}$
c	$1,40 \times 10^{-1}$	$1,44 \times 10^{-1}$	$1,62 \times 10^{-1}$	$1,94 \times 10^{-1}$	$2,19 \times 10^{-1}$
d	$7,04 \times 10^{-2}$	$3,21 \times 10^{-2}$	$3,82 \times 10^{-2}$	$3,88 \times 10^{-2}$	$4,12 \times 10^{-2}$
$R^2$	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98

A proposta de ajustes distintos a depender da condição avaliada ( $D_1$  ou  $D_{10}$ ) se justifica em razão das diferenças observadas no aspecto visual do escoamento e nos dados de pressão medidos

(especialmente no caso das pressões extremas), como abordado no tópico anterior (item 5.4). Desse modo, o usuário poderá optar pela condição mais conveniente, caso a caso.

Na face vertical do degrau, conforme Equação 5.11, a razão  $a/(1 + b)$  indica o valor de  $\Omega$  no ponto de impacto do jato (quando  $L' = 0$ ), ao passo que, na face horizontal do degrau,  $\Omega$  assume valores aproximadamente iguais à constante  $a$  nessa região (vide Equação 5.12). Para valores elevados de  $L'$  ( $L' > 10$ , aproximadamente),  $\Omega$  tende a zero tanto na face vertical quanto horizontal do degrau. Vale destacar que, nessa região, apesar de  $\Omega$  tender a zero, as pressões hidrodinâmicas tendem a um valor constante, não necessariamente nulo (ver Equação 5.9, Figura 5.21, Figura 5.22).

Na face vertical do degrau (Figura 5.23), os dados indicam que, quando  $L' > 2$ , os resultados obtidos para  $P_{med}$  são coincidentes, independentemente da equação de regressão adotada ( $D_1$ ,  $D_{10}$  ou  $D_1$  e  $D_{10}$  em conjunto). No caso das pressões extremas ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ), isso acontece quando  $L' > 6$ , aproximadamente. Já nas faces horizontais dos degraus (Figura 5.24), esse comportamento é observado quando  $L' > 4$ , aproximadamente, tanto para  $P_{med}$  quanto para as pressões extremas ( $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ).

Os resultados do coeficiente de determinação  $R^2$  são variados. Considerando os ajustes propostos para a face vertical dos degraus (Tabela 5.7), na maior parte dos casos tem-se  $0,70 < R^2 < 0,95$ , contudo, há situações em que  $R^2$  resulta inferior a 0,65 (como é o caso dos ajustes propostos para  $P_{med}$ ). Já na face horizontal do degrau (Tabela 5.8), de modo geral  $0,80 < R^2 < 0,95$ , com exceção de  $P_{med}$  e  $P_{\sigma}$  na condição  $D_1$  e  $D_{10}$  (em conjunto), onde  $0,70 < R^2 < 0,75$ . Sugere-se cautela no uso dos modelos aqui propostos, especialmente nos cenários em que  $R^2$  seja inferior a cerca de 0,70.

Ademais, o uso do modelo em posições onde  $L' > 10$  exige atenção especial, visto que a amostra de dados nessa região é menor (se comparada com a zona onde  $L' < 10$ ), o que pode impactar na consistência do resultado obtido nesses casos.

A metodologia proposta é válida para aplicação no escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida por sistema aerador semelhante ao utilizado nesse trabalho. Deve-se ressaltar que, em virtude de os dados serem provenientes de sistemas aeradores posicionados apenas em dois locais ao longo da calha, pode-se esperar resultados mais coerentes quando o modelo for aplicado nesses casos, ou, ainda, em posições intermediárias a estas. Ainda que as equações propostas possam ser utilizadas em situações em que o sistema aerador está posicionado em porções mais a jusante na calha (até mesmo a jusante do degrau nº10), recomenda-se cautela na utilização nesses casos. Para melhor avaliação e possível validação do modelo proposto, é imprescindível a comparação entre os resultados deste e os provenientes de ensaios adicionais em modelo físico (considerando, por exemplo, a instalação do sistema aerador em porções mais a jusante ao longo da calha, após o degrau nº10).

Os intervalos de validade dos principais parâmetros hidráulicos associados à elaboração do modelo de previsão, visando aplicação a outros casos, são  $3 \leq Fr_0 \leq 5,2$  e  $0,15 \leq h_c \leq 0,30$ . Além disso, o modelo proposto foi construído em uma calha com degraus de altura  $h_d = 0,06 \text{ m}$  e ângulo de inclinação  $\alpha = 53,13^\circ$ , considerando dispositivo aerador que possui  $\theta = 7,6^\circ$ ,  $1,3\% \leq \beta \leq 8,5\%$ .

A comparação em termos de pressão bruta entre os valores medidos e os valores estimados pelos modelos propostos consta no APÊNDICE I. Além disso, no APÊNDICE F avalia-se o comportamento de parte das equações de previsão de pressão aqui propostas, considerando dados experimentais coletados em outro modelo físico.

## 5.6 AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AR NO ESCOAMENTO

Como sugere parte dos trabalhos consultados e apresentados no Capítulo 3, a identificação das zonas sujeitas à ocorrência do fenômeno da cavitação em estruturas hidráulicas pode ser feita, dentre outros, por meio da avaliação do índice de cavitação  $\sigma$  e/ou das pressões hidrodinâmicas do escoamento. Porém, para uma estrutura hidráulica qualquer, ainda que os resultados associados ao índice  $\sigma$  e às pressões indiquem a chance de ocorrência da cavitação, isso não garante, invariável e necessariamente, o surgimento de danos no concreto. Isso porque, caso o escoamento possua certas quantidades mínimas de ar nas proximidades da estrutura hidráulica, então a região poderá estar protegida dos efeitos danosos da cavitação (ainda que o fenômeno ocorra).

Sendo assim, de modo a estabelecer com maior rigor quais as regiões críticas ao surgimento de danos, é fundamental a avaliação da concentração de ar no escoamento – em especial, no fundo do escoamento ( $C_b$ ), conforme já apontado no Capítulo 3. Contudo, o presente trabalho não contempla a medição experimental desse parâmetro.

No Capítulo 3 foram expostos modelos que permitem a estimativa da concentração de ar no escoamento sobre vertedouros em degraus, tanto considerando aeração natural (item 3.1.1) quanto induzida (item 3.4.3). Assim, no presente trabalho, a estimativa e análise da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  (isto é, nas proximidades da estrutura hidráulica) se deu com base em modelos já existentes, propostos por outros autores, a saber:

- i. Aeração natural: nesses casos, considerou-se a expressão sugerida por Matos (1999), representada pela Equação 3.7;
- ii. Aeração induzida na condição  $D_1$ : utilizou-se o modelo proposto por Pfister et al. (2006a), da Equação 3.36 até a Equação 3.38. Essa escolha se justifica, dentre outros motivos, em razão da semelhança no aspecto visual dos escoamentos na condição  $D_1$  e em Pfister et al. (2006a), como já destacado no item 5.2. Além disso, essa escolha também está fundamentada na avaliação dos intervalos de validade associados aos modelos de previsão dos diferentes autores avaliados, em comparação aos casos do presente trabalho (como apresentado na Tabela 5.9 e discutido posteriormente);

- iii. Aeração induzida na condição  $D_{10}$ : nesses casos utilizou-se o modelo desenvolvido por Terrier (2016) – Equação 3.39 até Equação 3.44, também em razão da maior semelhança visual entre os escoamentos na condição  $D_{10}$  e nas condições do referido autor, como também já discutido no item 5.2. Além disso, essa escolha também se justifica em razão das faixas de validade associadas às equações de Terrier (2016), em comparação aos casos do presente trabalho (como apresentado na Tabela 5.9 e discutido posteriormente).

Parte dos autores citados também sugere equações para estimativa da concentração de ar média no escoamento ( $C_a$ ). Porém, em razão dos objetivos aqui estabelecidos, foram utilizadas apenas as equações de concentração de ar no fundo  $C_b$ .

Nas condições de aeração induzida, além dos modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), considerou-se, ainda, para comparação de resultados, o mesmo método utilizado por Novakoski (2021), baseado na estimativa da concentração de ar através da análise visual do escoamento, nos ensaios em modelo. Em resumo, os resultados obtidos por meio desse método não apresentaram coerência física, tanto entre as diferentes condições avaliadas ( $D_1$  e  $D_{10}$ ) quanto quando em comparação com trabalhos que consideraram a medição da concentração de ar no fundo  $C_b$ . Porém, vale destacar que esta pode ser uma alternativa interessante para a estimativa preliminar e simplificada da concentração de ar, quando há modelo físico que permita a medição dos parâmetros envolvidos (em resumo, do coeficiente  $\beta$  e da profundidade do escoamento). Sendo assim, o método utilizado por Novakoski (2021) não deve ser descartado. Os resultados da aplicação desse método estão apresentados e discutidos no APÊNDICE J.

Na Tabela 5.9 constam os intervalos de validade dos principais parâmetros representativos do escoamento levados em conta por Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), quando da proposta de seus modelos de previsão de  $C_b$ . Tais intervalos foram comparados com os valores associados à presente pesquisa, nas condições de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ). Vale destacar que tanto Pfister et al. (2006a) quanto Terrier (2016) consideram calhas em degraus com inclinação  $\alpha = 50^\circ$  (portanto, semelhante à inclinação do presente trabalho). Além disso, o ângulo do defletor  $\theta$  também é semelhante entre os trabalhos: neste é  $\theta = 7,6^\circ$ , para Pfister et al. (2006a) é  $\theta = 8,13^\circ$  e, para Terrier (2016),  $5,71^\circ \leq \theta \leq 14,04^\circ$ . Os intervalos de validade das equações propostas pelos autores (e das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ ) aparecem nas notas de rodapé da Tabela 5.9 e no APÊNDICE E.

Tabela 5.9 – Avaliação dos parâmetros representativos do escoamento na aeração induzida, considerando os casos do presente trabalho, em comparação com os intervalos de validade dos modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016).

Condição	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	TERRIER (2016) <sup>63</sup>			PFISTER et al. (2006a) <sup>64</sup>			
		$Fr_0$	$h_d/h_0$	$t/h_0$	$Fr_0$	$h_d/h_0$	$t/h_0$	$h_c/h_d$
D <sub>1</sub> <sup>65</sup>	0,20	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓
	0,30	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
	0,40	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗
	0,50	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗
D <sub>10</sub> <sup>66</sup>	0,20	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	0,30	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
	0,40	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✗
	0,50	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✗

<b>LEGENDA</b>	✓	Caso inserido no intervalo avaliado pelos autores
	✗	Caso não inserido no intervalo avaliado pelos autores

Conforme Tabela 5.9, no caso do modelo de Terrier (2016), boa parte dos parâmetros associados à condição D<sub>10</sub> está inserida na faixa de validade do modelo proposto pelo autor, com exceção do parâmetro  $t/h_0$ . Terrier (2016) também recomenda  $L_j/h_0 > 8$  para que ocorra a aeração completa do escoamento (em profundidade) nas proximidades do impacto do jato sobre os degraus, de modo que sejam obtidos resultados comparáveis aos do próprio autor. Aqui, na condição D<sub>10</sub> tem-se  $3 \leq L_j/h_0 \leq 6$  e, mesmo que não compatível com o recomendado por Terrier (2016), ainda assim, o aspecto visual do escoamento foi muito semelhante ao do referido autor: a *blackwater* termina ao longo do jato ou muito próxima (logo a jusante) de seu ponto de impacto (ver Tabela 5.5). Assim, mesmo que nem todos os casos estejam enquadrados no intervalo de validade do autor, entende-se que a aplicação do modelo de Terrier (2016) se justifica no caso da condição D<sub>10</sub>, principalmente em razão da semelhança no aspecto visual do escoamento entre essas situações.

Já na condição D<sub>1</sub>, a maior parte dos casos não está inserida na faixa de validade de Terrier (2016). Isso, somado ao fato da distinção entre o aspecto visual do escoamento – isto é, o escoamento avaliado por Terrier (2016) não é semelhante ao da condição D<sub>1</sub> aqui avaliada (como já apresentado nos itens 3.4.3 e 5.2) – reforça a incoerência na adoção do modelo desse autor na estimativa da concentração de ar na condição D<sub>1</sub>.

Com relação ao modelo de previsão proposto por Pfister et al. (2006a), boa parte dos parâmetros do escoamento, tanto na condição D<sub>1</sub> quanto na D<sub>10</sub>, está enquadrada nos intervalos avaliados pelos autores – com exceção de  $h_c/h_d$ , como será melhor abordado na sequência. O aspecto visual do escoamento na condição D<sub>10</sub> é muito distinto do de Pfister et al. (2006a), como já apresentado nos itens 3.4.3 e 5.2. Por outro lado, quando comparado o aspecto visual do escoamento na

<sup>63</sup> Em Terrier (2016) vale  $3,2 \leq Fr_0 \leq 7,5$ ;  $0,65 \leq h_d/h_0 \leq 1,15$ ;  $0,16 \leq t/h_0 \leq 0,60$ .

<sup>64</sup> Em Pfister et al. (2006a) vale  $2,7 \leq Fr_0 \leq 5,8$ ;  $0,47 \leq h_d/h_0 \leq 2,83$ ;  $0,04 \leq t/h_0 \leq 0,24$ ;  $1 \leq h_c/h_d \leq 3$  (embora tenham considerado casos inseridos no intervalo  $1,15 \leq h_c/h_d \leq 4,54$ , como será discutido a seguir).

<sup>65</sup> Em D<sub>1</sub> tem-se  $3,05 \leq Fr_0 \leq 3,95$ ,  $0,43 \leq h_d/h_0 \leq 0,94$ ,  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,16$  e  $2,70 \leq h_c/h_d \leq 4,90$ , ver Tabela 5.1.

<sup>66</sup> Em D<sub>10</sub> tem-se  $4,50 \leq Fr_0 \leq 5,23$ ,  $0,56 \leq h_d/h_0 \leq 1,13$ ,  $0,09 \leq t/h_0 \leq 0,19$  e  $2,70 \leq h_c/h_d \leq 4,90$ , ver Tabela 5.1.

condição  $D_1$  com os casos estudados por Pfister et al. (2006a), há grande semelhança entre eles (principalmente na extensão da *blackwater*, que avança para jusante do ponto de impacto do jato). Além disso, na formulação de Pfister et al. (2006a) não constam parâmetros onde a variação do posicionamento do aerador na calha pudesse refletir em incremento na concentração de ar. Assim, o modelo de previsão de concentração de ar proposto por Pfister et al. (2006a) será aplicado apenas à condição  $D_1$  do presente trabalho.

Com relação ao parâmetro  $h_c/h_d$ , a Tabela 5.9 indica que apenas os casos associados à  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  são compatíveis ao intervalo sugerido por Pfister et al. (2006a). Porém, vale destacar que o trabalho de Pfister et al. (2006a) avalia casos incluídos no intervalo  $1,15 \leq h_c/h_d \leq 4,54$  (o que engloba quase todos os casos das condições  $D_1$  e  $D_{10}$  aqui avaliados, entre  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  – ver notas de rodapé da Tabela 5.9 e APÊNDICE E). Mesmo assim, Pfister et al. (2006a) limitaram uma das equações de previsão de  $C_b$  ao intervalo  $1 \leq h_c/h_d \leq 3$ . Contudo, os próprios autores aplicaram o modelo em situações onde  $h_c/h_d > 3$ , obtendo bons resultados – conforme Figura 4a de Pfister et al. (2006a). Portanto, pelo exposto, entende-se que o modelo de Pfister et al. (2006a) é adequado para previsão de  $C_b$  na condição  $D_1$ , até mesmo quando  $h_c/h_d > 3$ .

Posto isso, com base nos critérios e métodos expostos, a Figura 5.25 apresenta os resultados de concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ , ao longo dos degraus da calha, nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , para  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Para melhor visualização, os resultados aparecem separados por vazão específica  $q$  e também por condição (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ). Além disso, limitou-se a representação de  $C_b$  ao intervalo  $0 \leq C_b \leq 0,35$ . Na Figura 5.25 também está indicada a localização dos pontos característicos do escoamento (início de aeração, impacto do jato e final da *blackwater*), definidos a partir da análise visual, conforme apresentado no item 5.2 (Tabela 5.5). Reforça-se que a estimativa de  $C_b$  considera, na condição de aeração natural (NAT), o modelo de Matos (1999). Já nas condições de aeração induzida são considerados os modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), em  $D_1$  e  $D_{10}$ , respectivamente, conforme critérios já expostos.

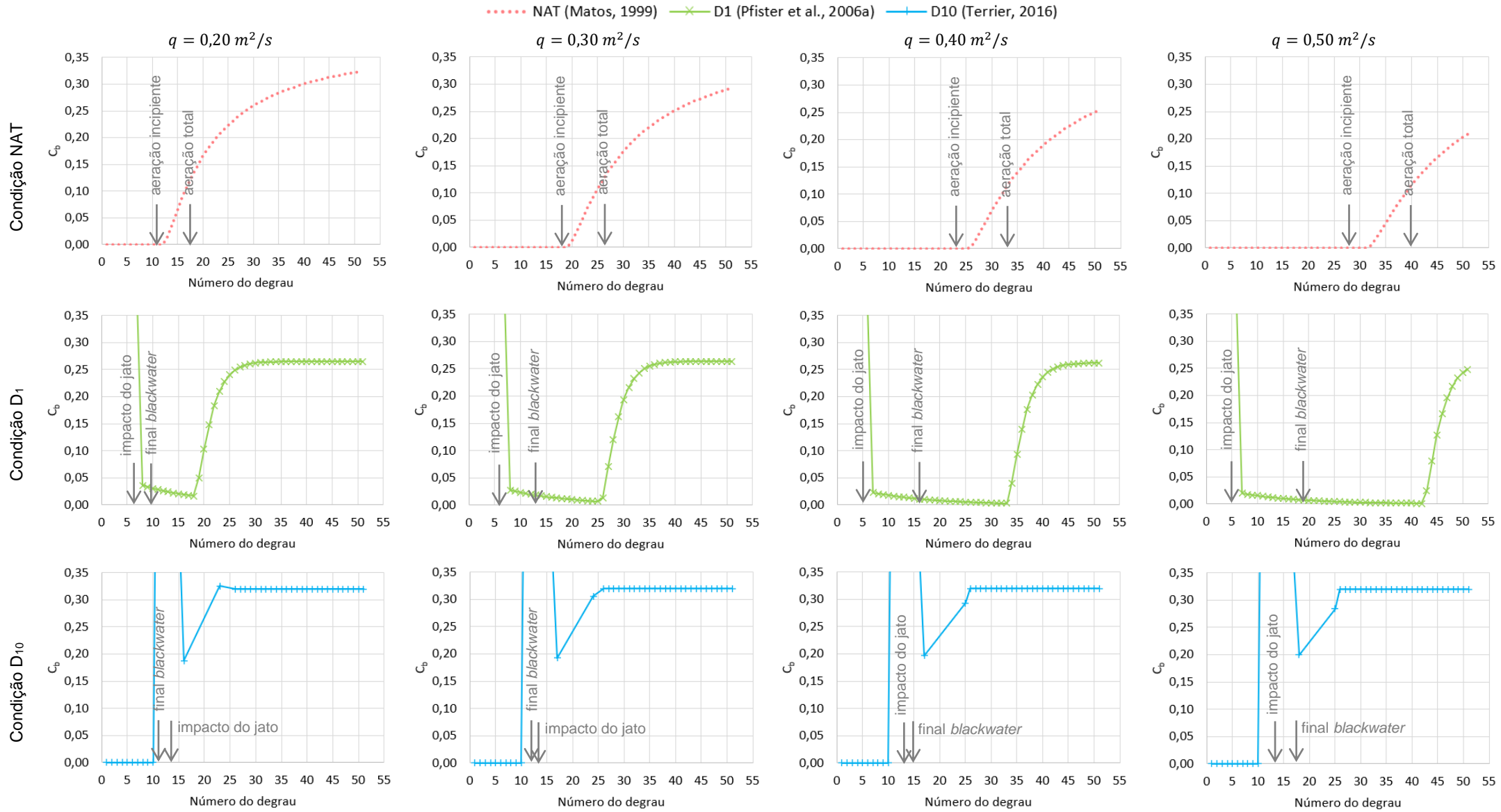


Figura 5.25 – Concentração de ar  $C_b$  calculada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10. Representação separada caso a caso.



Com base na Figura 5.25, os resultados de  $C_b$  na condição NAT indicam duas regiões bem distintas, como esperado: a primeira, a montante do ponto de início de aeração, em que  $C_b = 0$  (ou seja, o escoamento é monofásico, composto apenas por água), e a segunda, a jusante do mesmo ponto, onde  $C_b > 0$  (isto é, passa a existir escoamento ar-água). Na aplicação do modelo de Matos (1999), optou-se por estabelecer o ponto de início de aeração natural do escoamento com base em Meireles et al. (2012) – Equação 4.3. Assim,  $C_b$  assume valores maiores do que zero a partir do ponto resultante da aplicação desta equação (isto é, nos degraus n<sup>os</sup> 13, 20, 26 e 32, aproximadamente, desde 0,20 até 0,50 m<sup>2</sup>/s, conforme Figura 5.25). Como deveria, os resultados da Equação 4.3 são bastante próximos do chamado “início de aeração incipiente” verificado visualmente durante os ensaios na condição NAT, já apresentado no item 5.2 e destacado novamente na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Degrau de ocorrência dos principais pontos característicos do escoamento, nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, com base na análise visual dos ensaios.

$q$ (m <sup>2</sup> /s)	NAT	D <sub>1</sub>		D <sub>10</sub>	
	Aeração incipiente	Impacto do jato	Final da <i>blackwater</i>	Impacto do jato	Final da <i>blackwater</i>
0,20	11	6	10	14	12
0,30	18	6	13	14	13
0,40	23	5	16	14	15
0,50	28	5	19	14	17

Já com relação aos resultados de  $C_b$  na condição D<sub>1</sub>, a montante do degrau onde ocorre o impacto do jato sobre a calha (ver Tabela 5.10 e Figura 5.25), tem-se  $C_b = 1$ , dado que não há água em contato com os degraus, apenas ar. Esse resultado não aparece na Figura 5.25 uma vez que, nela, a representação de  $C_b$  está limitada ao intervalo  $0 \leq C_b \leq 0,35$ .

O comportamento geral de  $C_b$  na condição D<sub>1</sub> está melhor representado na Figura 5.26, a seguir. Após o impacto do jato sobre os degraus, há uma região onde  $C_b$  decresce lentamente, conforme o escoamento avança para jusante na calha, até o ponto onde há o crescimento abrupto e significativo de  $C_b$ . Finalmente, nas porções finais da calha,  $C_b$  tende a se estabilizar em torno de um valor constante e igual a 0,26, aproximadamente, o que sugere que o escoamento atingiu o regime quase uniforme (onde profundidade, velocidade e concentração de ar são praticamente constantes). Essas regiões aparecem em destaque na Figura 5.26.

Vale observar que, em conformidade com o modelo de Pfister et al. (2006a), a condição de escoamento quase uniforme não é atingida na vazão  $q = 0,50$  m<sup>2</sup>/s (ver Figura 5.25). Ou seja, nesse caso, a combinação entre a vazão do escoamento e o comprimento de calha não foi suficiente para que o escoamento atingisse esse regime. Para as demais vazões analisadas (todas inferiores à  $q = 0,50$  m<sup>2</sup>/s), os resultados indicam que o regime quase uniforme foi alcançado (Figura 5.25).

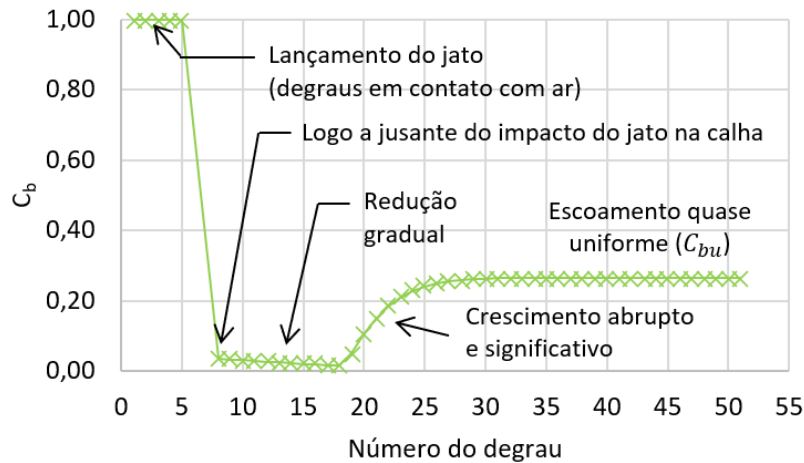


Figura 5.26 – Destaque para o comportamento de  $C_b$ , conforme modelo de Pfister et al. (2006a) aplicado à condição  $D_1$ ,  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ainda com relação à  $C_b$  na condição  $D_1$ , conforme Figura 5.25, percebe-se que o aumento abrupto em  $C_b$  inicia a partir dos degraus n<sup>os</sup>18, 26, 33 e 42 (respectivamente, desde 0,20 até 0,50  $\text{m}^2/\text{s}$ ), ao passo que o final da *blackwater*, identificado visualmente durante os ensaios, ocorre nos degraus n<sup>os</sup>10, 13, 16 e 19 (respectivamente, para as mesmas vazões, ver Tabela 5.10 e Figura 5.25). Assim, poder-se-ia supor que os resultados não são coerentes, especialmente na região onde ocorre a redução gradual de  $C_b$ . Isso porque é justo supor, inicialmente, que o decréscimo de  $C_b$  deveria se estender, no máximo, até o final da *blackwater* e, a partir de então, deveria aumentar.

Contudo, como identificado por Pfister et al. (2006a) – e também já mencionado no Capítulo 3 – as medições dos referidos autores indicaram que o decaimento de  $C_b$  não se limita à região onde há a *blackwater*, mas, pelo contrário, estende-se para jusante dela. Assim, entende-se que os resultados obtidos na condição  $D_1$  a partir da aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a) são coerentes. Mais adiante, no item 5.6.1, esse cenário é avaliado mais detidamente.

Uma última observação, ainda associada aos resultados da condição  $D_1$ , é o fato de que, para todas as vazões avaliadas, entre o impacto do jato na calha e o crescimento abrupto mais a jusante,  $C_b$  é sempre inferior a 0,05. Este valor é menor do que o mínimo recomendado por Peterka (1953) para que não aconteça erosão significativa por cavitação (que é  $C_b \approx 0,07$ , como exposto no item 3.3).

Finalmente, para a condição  $D_{10}$ , os resultados a montante do degrau onde está posicionado o aerador (degrau n<sup>o</sup>10) apresentam  $C_b = 0$  (Figura 5.25). Vale ressaltar que, nessa região, o escoamento está submetido à aeração natural e, para as vazões consideradas, a aeração natural no escoamento não inicia antes do degrau n<sup>o</sup>10. Isso também pode ser confirmado avaliando-se os resultados associados à  $C_b$  na condição NAT (Figura 5.25), onde  $C_b > 0$  sempre após o degrau n<sup>o</sup>10. A seguir, na zona entre o lançamento do escoamento e o impacto do jato na calha, tem-se  $C_b = 1$ , do mesmo modo como na condição  $D_1$ , dado que nessa região os degraus têm contato apenas com o ar proveniente do aerador. Esse intervalo não está representado na Figura 5.25 (pela limitação no intervalo de representação de  $C_b$ ), mas está destacado na Figura 5.27.

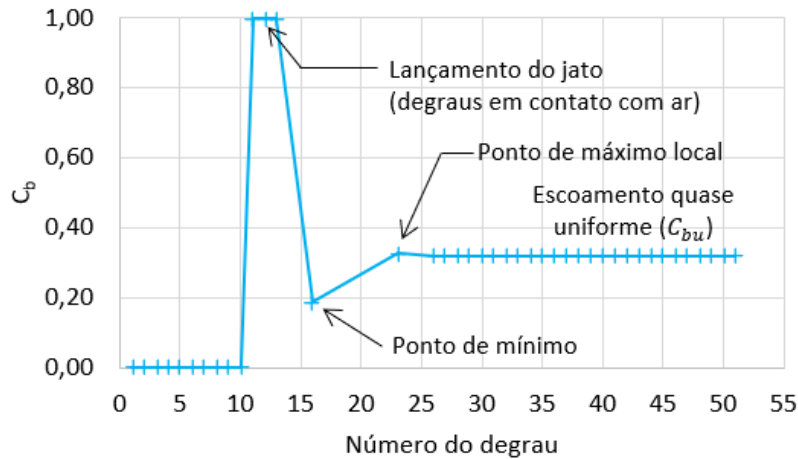


Figura 5.27 – Destaque para o comportamento de  $C_b$ , conforme modelo de Terrier (2016) aplicado à condição  $D_{10}$ ,  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Como apresentado no item 3.4.3, Terrier (2016) estabeleceu a Equação 3.42 para determinação do ponto associado ao mínimo valor de  $C_b$ , que ocorre na região de impacto e restabelecimento do jato, bem como a Equação 3.43, para determinação do ponto de máximo, também associado ao desenvolvimento do jato. Finalmente, conforme Equação 3.44, Terrier (2016) estabeleceu a região onde o escoamento assume características praticamente uniformes, chegando a  $C_{bu} \approx 0,32$ .

Vale ressaltar que o ponto de máximo apontado não é global, mas sim local, estando associado à região influenciada pelo impacto do jato e restabelecimento do escoamento na calha. Ver na Figura 5.25, por exemplo, que para as situações onde  $q \geq 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ ,  $C_{bu}$  é maior do que o ponto de máximo local. Com relação ao ponto de mínimo, observa-se que o valor obtido para todas as vazões avaliadas é semelhante ( $C_b \approx 0,20$ ) e cerca de três vezes superior ao valor apontado por Peterka (1953) como mínimo para a não ocorrência de erosão significativa ( $C_b \approx 0,07$ ). O valor mínimo encontrado para  $C_b$  (isto é,  $C_b \approx 0,20$ ), está em conformidade com os dados medidos por Terrier (2016), como indicado no item 3.4.3.

Vale observar que a conexão direta entre os resultados associados aos pontos de mínimo e máximo pode não ser a representação mais fiel (visto que não necessariamente a evolução de  $C_b$  se dará dessa maneira). Porém, com o intuito de tornar mais claro o entendimento do comportamento, esta parece ser a representação mais adequada.

Com relação ao escoamento na zona quase uniforme, é importante destacar que não só o valor associado a  $C_{bu}$  de Terrier (2016) é maior do que o apontado por Pfister et al. (2006a) –  $C_{bu} \approx 0,32$  contra  $C_{bu} \approx 0,26$  – como também ocorre em porções mais a montante na calha, pouco depois do ponto de máximo local (ver Figura 5.25).

A Figura 5.28 permite a comparação direta entre os resultados de  $C_b$  nas diferentes condições avaliadas. Nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  omitiu-se o resultado a montante do impacto do jato para melhor visualização do comportamento.

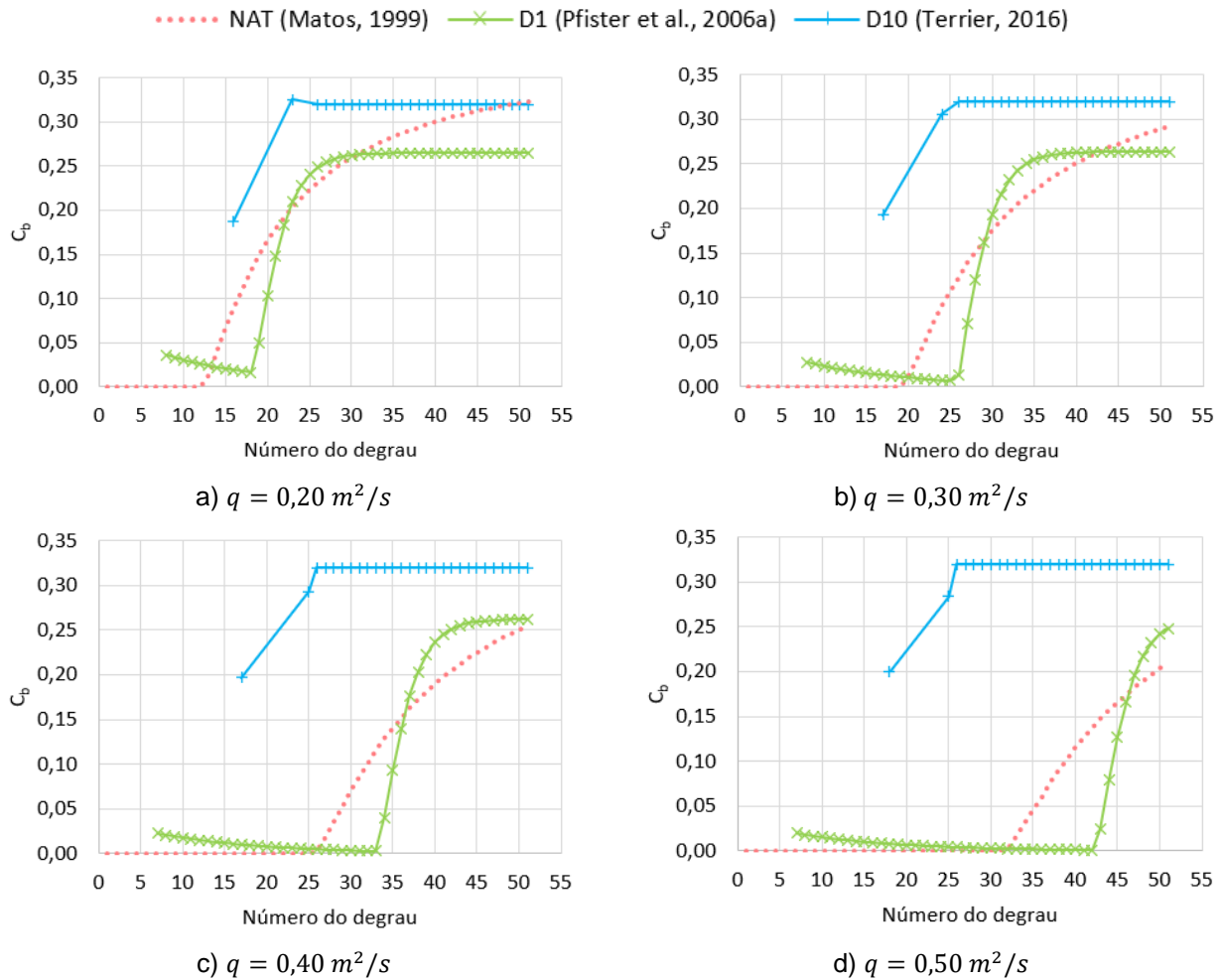


Figura 5.28 – Representação conjunta da concentração de ar  $C_b$ , calculada ao longo da calha, nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>.

Levando em conta o aspecto visual do escoamento nas condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub> (ver item 5.2, em especial Figura 5.6 e Figura 5.7), é de se esperar que haja diferença entre  $C_b$  em tais condições. Conforme Figura 5.28, a ordem de grandeza dos resultados associados à condição D<sub>10</sub> – obtidos pela aplicação do modelo de Terrier (2016) – foi muito superior aos valores da condição D<sub>1</sub> – pelo modelo de Pfister et al. (2006a). Isso é observado não só na região quase uniforme ( $C_{bu}$ ) mas principalmente logo a jusante do impacto do jato, onde  $C_b \approx 0,20$  – pela aplicação das equações de Terrier (2016) –, independentemente da vazão do escoamento. Embora esse resultado possa ser coerente, deve-se destacar que, para o mesmo valor de  $Fr_0$ , o coeficiente de entrada de ar  $\beta$  obtido por Terrier (2016) em seus ensaios foi superior ao medido aqui, na condição D<sub>10</sub> (ver Figura 5.17). Assim, é possível que a aplicação do modelo de Terrier (2016) na condição D<sub>10</sub> superestime o valor de  $C_b$ , principalmente nas proximidades do impacto do jato. De qualquer forma vale lembrar que, ainda que esteja superestimado, o valor obtido nessa região é cerca de três vezes superior ao praticado para a não ocorrência de erosão por cavitação, como já pontuado.

Um fato interessante, evidenciado pela Figura 5.28, é a conclusão obtida quando se avaliam os resultados das condições D<sub>1</sub> e NAT. Seria razoável supor que, de modo geral, os resultados de  $C_b$  na condição D<sub>1</sub> deveriam ser pelo menos iguais ou superiores aos da condição NAT, porém, não foi

este o comportamento observado ao longo de toda a calha. Nas proximidades do ponto de início de aeração natural (isto é, onde  $C_b$  passa a ser maior do que zero, nessa situação),  $C_b$  na condição NAT logo supera os resultados de  $C_b$  da condição  $D_1$ . Por exemplo, pela Figura 5.28d, entre os degraus de n<sup>os</sup>35 e 45, haverá mais ar no fundo do escoamento na condição NAT do que na condição  $D_1$ . Ou seja, caso haja condições suficientes para a ocorrência de cavitação nessa região, a estrutura estaria mais protegida dos efeitos danosos do fenômeno caso estivesse submetida à aeração natural, e não à condição  $D_1$ . Algumas hipóteses que buscam justificar esse fato constam no item 5.6.2.

Vale ressaltar que os resultados apresentados neste item não foram medidos, mas sim calculados a partir da aplicação de modelos de previsão propostos por outros autores. Assim, ainda que tenham sido aplicados a casos inseridos no intervalo de validade das equações (embora haja exceções, como discutido anteriormente), e que o aspecto visual do escoamento seja semelhante, é justo supor que os modelos utilizados podem não ser inteiramente compatíveis, no que diz respeito à estimativa de  $C_b$ , à instalação experimental utilizada neste trabalho. Então, de modo a verificar os resultados de  $C_b$  estimados, bem como as hipóteses mencionadas, é imprescindível considerar-se, em trabalhos futuros, a medição da concentração de ar no escoamento nas mesmas condições que as aqui avaliadas.

Na tentativa de avaliar  $C_b$  por meio de uma abordagem mais simplificada e direta, no APÊNDICE K apresentam-se os resultados associados à  $C_b$  nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  calculados não apenas com base nos modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), mas também estimados com base no modelo de Matos (1999). Trata-se, porém, de uma aproximação, de uma estimativa – podendo ser considerada quando o usuário não dispõe dos dados necessários para emprego das equações mais adequadas, por exemplo –, visto que esse modelo foi concebido para escoamentos submetidos à aeração natural. Assim, essa abordagem deve ser encarada como de caráter simplificado.

A avaliação das prováveis zonas submetidas a danos pode ser feita, por exemplo, com base na análise conjunta entre os resultados de pressão do escoamento e de  $C_b$ . O item 5.6.3 trata desse assunto, enquanto nos itens 5.6.1 e 5.6.2 tem-se mais detalhes associados à estimativa de  $C_b$ .

### 5.6.1 Considerações sobre a estimativa de $C_b$ na condição $D_1$

Neste item são feitas considerações adicionais relacionadas à estimativa da concentração de ar  $C_b$  na condição  $D_1$ . A Figura 5.29 apresenta  $C_b$  na condição  $D_1$ , calculado pelo modelo de Pfister et al. (2006a), de forma agrupada para  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

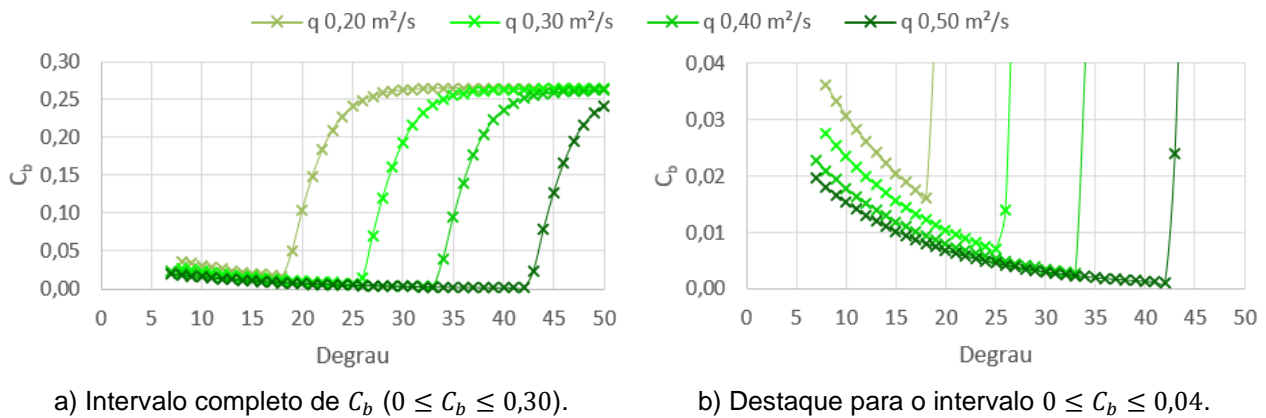


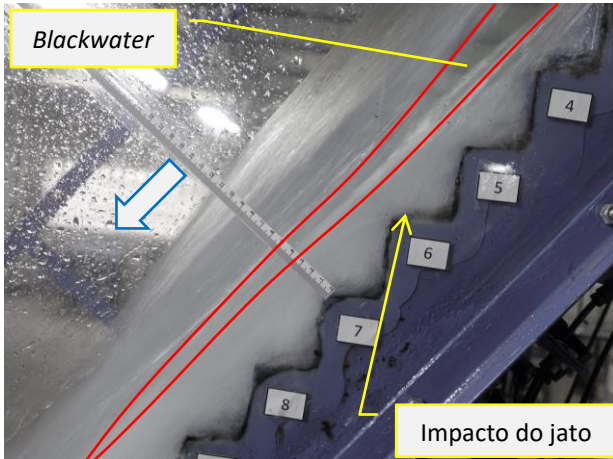
Figura 5.29 – Resultados de concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ , pela aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a), na condição  $D_1$ .

Como mencionado no item anterior, percebe-se pela Figura 5.29b que, após um intervalo de decaimento lento em  $C_b$ , ocorre um aumento abrupto aproximadamente nos degraus n<sup>os</sup>18, 26, 33 e 42 (respectivamente, desde 0,20 até 0,50  $m^2/s$ ), ao passo que o final da *blackwater* ocorre nos degraus n<sup>os</sup>10, 13, 16 e 19 (respectivamente, para as mesmas vazões, ver Tabela 5.10). Vale lembrar que o final da *blackwater* é marcado pela região onde há o encontro entre a aeração inferior do escoamento (proveniente do aerador) e superior (proveniente da superfície livre), conforme definido e apresentado no item 5.2. Ou seja, poderia se supor inicialmente que o decaimento de  $C_b$  deveria se estender até o final da *blackwater*, no máximo, o que invalidaria a aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a) nessa situação.

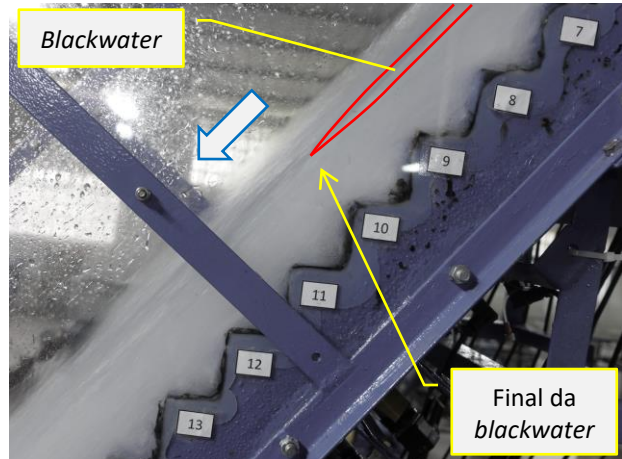
Contudo, Novakoski (2021), quando da análise visual do escoamento na condição  $D_1$  (nas mesmas situações que as avaliadas no presente trabalho) identificou um ponto importante, que pode ter relação com o incremento abrupto em  $C_b$  e, indiretamente, validar a aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a). Trata-se de um ponto localizado em porções mais afastadas do final da *blackwater*, caracterizado pelo aumento da profundidade do escoamento e ocorrência de ondulações e maiores perturbações na superfície livre. Novakoski (2021) classificou esse ponto como “início da aeração superior”, tendo sido definido como “o ponto onde a incorporação de ar tem início, provavelmente, devido à influência da macrorrugosidade dos degraus, ou seja, no momento em que a camada limite atinge a superfície livre do escoamento” (NOVAKOSKI, 2021, p. 100). Ainda, a autora menciona que este ponto parece ser “equivalente ao ponto de início de aeração determinado em vertedouros em degraus com aeração natural, local onde a incorporação de ar pela superfície aumenta consideravelmente” (NOVAKOSKI, 2021, p. 101). Ou seja, parece justo supor que deve haver certa relação entre o “início da aeração superior”, definido por Novakoski (2021), e o aumento abrupto em  $C_b$ , quando da aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a).

A Figura 5.30 apresenta registros fotográficos do escoamento na condição  $D_1$  ( $q = 0,20 m^2/s$ ), destacando alguns dos pontos característicos do escoamento, como o impacto do jato e a *blackwater* (Figura 5.30a, Figura 5.30b, já mencionados no item 5.2), bem como o ponto associado ao “início da aeração superior” (Figura 5.30c, Figura 5.30d), definido por Novakoski (2021).

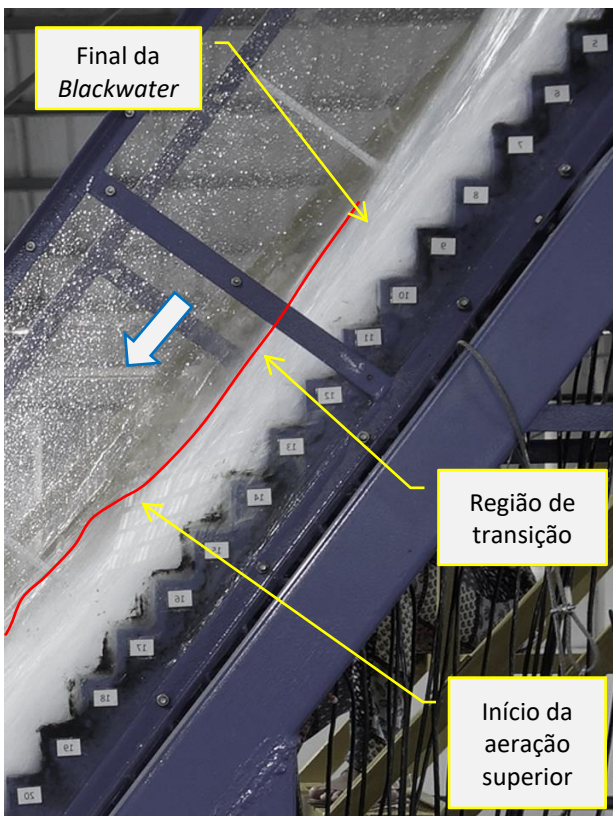
Como representado na Figura 5.30a, o início da aeração na parcela inferior do escoamento (próximo à calha) coincide com o ponto de impacto do jato, como definido no item 5.2. Novakoski (2021) identificou que, imediatamente após a *blackwater*, há uma região de transição e, na sequência, tem-se o início da aeração superior (Figura 5.30c). Esse ponto pode ser mais facilmente identificado na vista frontal (Figura 5.30d), quando se identifica o escoamento com aspecto de “água branca” em toda a largura e profundidade da calha, não sendo mais visíveis os degraus ao fundo.



a) Região de impacto do jato, em vista lateral.



b) Região de final da *blackwater*, em vista lateral.



c) Região de transição, em vista lateral.



d) Aspecto do escoamento, em vista frontal.

Figura 5.30 – Fotografias de alguns dos pontos característicos do escoamento, condição  $D_1$ ,  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

A Tabela 5.11 apresenta os referidos pontos, para todas as vazões aqui avaliadas ( $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Nesta tabela também constam os degraus onde se observa o

aumento abrupto em  $C_b$ , calculado conforme Pfister et al. (2006a), também evidenciado pela Figura 5.29b.

Tabela 5.11 – Pontos característicos do escoamento na condição  $D_1$ , representados em termos do nº do degrau onde ocorrem, definidos com base na análise visual do escoamento.

$q$ ( $m^2/s$ )	Impacto do jato (e início da aeração inferior)	Final da <i>blackwater</i>	Início da aeração superior (NOVAKOSKI, 2021)	Aumento abrupto em $C_b$ (por Pfister et al., 2006a)	Início da aeração total (condição NAT)
0,20	6	10	16	18	18
0,30	6	13	25	26	26
0,40	5	16	33	33	34
0,50	5	19	40	42	40

Analisando a Tabela 5.11 percebe-se considerável semelhança entre o degrau onde inicia a aeração superior do escoamento (como identificado por Novakoski, 2021) e o degrau onde inicia o aumento abrupto em  $C_b$  (calculado pelo modelo de Pfister et al., 2006a). Além disso, ambos os pontos também apresentam estreita semelhança com o “início da aeração total”, na condição NAT, como já definido no item 5.2 (ver Tabela 5.5), o que também corrobora com as observações de Novakoski (2021).

Sendo assim, pelo exposto, as análises desenvolvidas reforçam a coerência nos resultados de  $C_b$  obtidos a partir da aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a), e sugerem que este parece ser adequado para previsão dos valores de  $C_b$  na condição  $D_1$ .

Porém, vale destacar que é possível que já haja trocas de ar – ainda que em quantidade limitada – entre a aeração inferior (abaixo da *blackwater*, proveniente do sistema aerador) e superior (acima da *blackwater*, proveniente da superfície) assim que a *blackwater* termina (portanto, a montante do “início da aeração superior” e, conseqüentemente, a montante do aumento abrupto em  $C_b$ ). Este fato também foi mencionado por Novakoski (2021). Ou seja, pode-se sugerir que o aumento em  $C_b$  devesse ocorrer também a montante do ponto de “início de aeração superior”, refletindo um incremento na aeração no fundo do escoamento, em razão das referidas trocas de ar. Contudo, não foi o observado quando da utilização do modelo de Pfister et al. (2006a). De qualquer forma, o resultado obtido (isto é, sem o suposto incremento em  $C_b$  logo após o final da *blackwater*) é favorável à segurança.

### 5.6.2 Considerações sobre $C_b$ nas condições NAT e $D_1$

Como apresentado anteriormente (Figura 5.28), quando considerada uma mesma vazão escoada pela estrutura, em alguns trechos ao longo da calha os resultados indicam que há mais ar no fundo do escoamento na condição NAT do que na condição  $D_1$ . Isso está representado, novamente, na Figura 5.31 (para  $q = 0,20 m^2/s$ ). À primeira vista esse resultado pode parecer incoerente, dado que poderia se supor que sempre deveria haver mais ar no fundo do escoamento na condição de



aeração induzida do que na aeração natural. Contudo, como sugere a Figura 5.31, para  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ , até o degrau nº14 há mais ar na condição  $D_1$ , ao passo que, no trecho situado entre os degraus nº14 e nº23, é o escoamento na condição NAT que apresenta maior  $C_b$ .

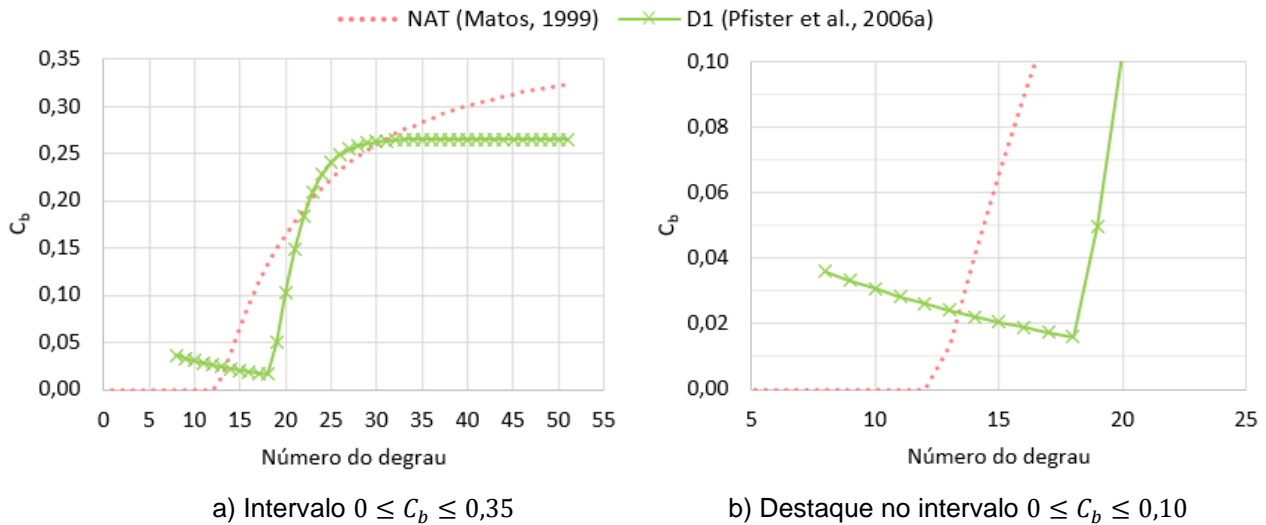


Figura 5.31 – Concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ , ao longo da calha, nas condições NAT e  $D_1$ , para  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

A Figura 5.32 representa esquematicamente o caso mencionado (condições NAT e  $D_1$ ,  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ ), com destaque a alguns dos principais pontos característicos do escoamento.

A distribuição das bolhas de ar no escoamento tem relação com o movimento de difusão do ar, que se promove das concentrações mais elevadas para as menores. Na condição NAT, a entrada de ar se dá essencialmente pela turbulência, como já referido, quando a camada limite turbulenta intercepta a superfície livre do escoamento. Nesse caso, a concentração de ar na superfície livre é muito maior do que junto ao fundo, de modo que a difusão do ar ocorre no sentido de cima para baixo – e muito rapidamente, devido principalmente à intensidade elevada da turbulência do escoamento.

Já na condição  $D_1$ , dado que o ar inicialmente é inserido pela parcela inferior do escoamento (pelo aerador), a concentração de ar junto ao fundo é muito maior do que nas porções mais altas. Desse modo, o movimento natural do escoamento será o de libertar as bolhas de ar e, portanto, fazer com que a concentração de ar junto ao fundo  $C_b$  diminua no sentido do escoamento, a jusante do impacto do jato (ver Figura 5.25). Porém, quando a turbulência junto à superfície livre do escoamento já é suficientemente forte (com o desenvolvimento pleno da camada limite), também ocorrerá o aumento abrupto em  $C_b$  na condição  $D_1$ . Nessa região, a difusão do ar ocorre no sentido de cima para baixo (da superfície livre em direção aos degraus) e também muito rapidamente, pelos mesmos motivos que na condição NAT.

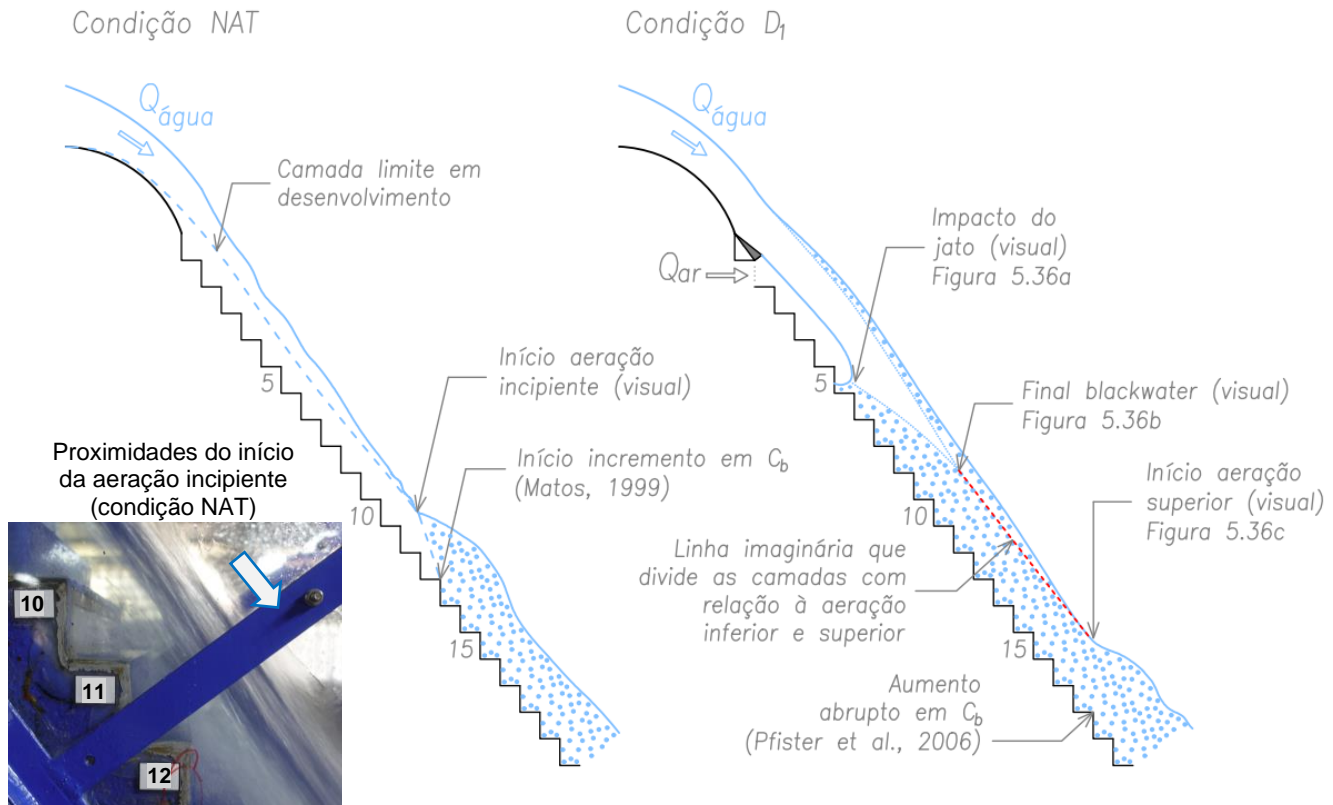


Figura 5.32 – Representação esquemática do escoamento, em vista lateral, nas condições NAT e  $D_1$ , para  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Por isso, na condição  $D_1$ , o aumento abrupto em  $C_b$  não se dá imediatamente após o final da *blackwater* – quando a aeração inferior (proveniente do sistema aerador) encontra a aeração superior (proveniente da superfície livre) – e sim apenas após o afloramento da camada limite turbulenta na superfície. Deve-se admitir que após o final da *blackwater* há certo nível de turbulência, que contribui para a entrada de ar nas porções mais superiores do escoamento. Porém, nesta região, o grau de turbulência ainda não é capaz de transferir o ar da superfície até o fundo (que tende ainda a libertar o ar que entrou). Em outras palavras, após o final da *blackwater*, há menos intensidade de turbulência na superfície livre em comparação com a região onde o ar é inserido com o afloramento da camada limite em si – que ocorre logo mais, a jusante.

Assim, conforme Figura 5.32, na condição  $D_1$ , no trecho entre os degraus nº10 (final da *blackwater*) e nº16 (início da aeração superior), poderia se supor a existência de duas camadas relativamente independentes no que diz respeito à aeração do escoamento em profundidade: uma delas sujeita à aeração inferior (proveniente do sistema aerador) e outra, mais superficial, sujeita à aeração superior (proveniente da superfície). A linha (imaginária) que divide ambas as camadas está representada na Figura 5.32. Embora deva haver trocas entre ambas as camadas nesse trecho, tais trocas são irrelevantes no que diz respeito à concentração de ar no fundo  $C_b$ .

Deve-se reconhecer, ainda, que o mecanismo de desenvolvimento da camada limite turbulenta nas condições NAT e  $D_1$  é distinto: enquanto na primeira avança gradativamente desde as proximidades

da crista do vertedouro, na segunda é impactada pela presença do defletor e pelo jato. Poderia se supor qualitativamente que, após o impacto do jato nos degraus na condição  $D_1$ , o desenvolvimento da camada limite abrangesse o mesmo número de degraus que o da condição NAT, contudo, essa correspondência não se confirma na totalidade dos casos avaliados. O fato é que, ainda que seja considerada essa aproximação, o aumento abrupto em  $C_b$  na condição  $D_1$  ocorre sempre em porções mais a jusante do que na condição NAT, para uma mesma vazão (ver Figura 5.28).

Na condição  $D_1$ , é possível que a aeração inferior (proveniente do sistema aerador) reduza o coeficiente de perda de carga do escoamento, impactando no alcance da aeração superior (proveniente da superfície) até o fundo da calha, mesmo no trecho a jusante do final da *blackwater*. De acordo com as conclusões de Zamora et al. (2008), Novakoski (2021) e Tassinari (2022) – como apresentado no item 3.4.6 – a redução do fator de atrito na condição  $D_1$  não é capaz de impactar negativamente na dissipação de energia total do escoamento (em comparação à condição NAT), no final da calha. Porém, pelo julgamento da autora, nada se pode afirmar com relação a possíveis trechos localizados. Inclusive, como apontam alguns resultados de Tassinari (2020), a diferença na dissipação de energia entre as condições de escoamento submetido à aeração natural e induzida pode atingir a ordem de 20% a 30% em alguns trechos. Assim, segundo esta hipótese, a possível redução na perda de carga na condição  $D_1$ , no trecho entre os degraus nº6 e nº16 (Figura 5.32), pode facilitar a descida do escoamento sobre os degraus e, de certa forma, dificultar o desenvolvimento da camada limite nessa região – o que justificaria o fato de o aumento em  $C_b$  na condição  $D_1$  ocorrer sempre mais a jusante do que na condição NAT. Contudo, deve-se admitir que essa hipótese (de redução do coeficiente de perda de carga do escoamento pela aeração inferior) careça de embasamento e, por conta disso, pode ter relevância reduzida neste momento.

Por fim é importante destacar que, no que diz respeito aos valores de  $C_b$  (ver Figura 5.31), a montante do degrau nº13, enquanto na condição NAT tem-se  $C_b = 0$ , na condição  $D_1$  tem-se  $C_b > 0,02$ . Este valor, embora baixo, pode ser importante quando se está avaliando a possível proteção da estrutura frente aos danos por cavitação. Por outro lado, a jusante desse ponto,  $C_b$  é decrescente na condição  $D_1$  (até o degrau nº18), enquanto na condição NAT tem-se  $C_b > 0,02$  e crescente. Assim, reforça-se a necessidade de que cada caso seja avaliado isoladamente, no sentido de verificar a necessidade ou não da instalação de um sistema aerador na estrutura, bem como definir-se o melhor posicionamento para tal ao longo da calha. O tópico seguinte aborda esses aspectos.

Os resultados e as conclusões apontadas neste item foram construídos valendo-se dos resultados apresentados na Figura 5.31 e na Figura 5.32, associadas à vazão  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ , porém, o comportamento é semelhante nas demais vazões avaliadas (conforme resultados apresentados na Figura 5.25, na Figura 5.28 e na Tabela 5.11).

### 5.6.3 Análise conjunta entre $C_b$ e as pressões extremas mínimas $P_{0,1\%}$

A avaliação das prováveis zonas submetidas a danos decorrentes da cavitação pode ser feita, por exemplo, com base na análise conjunta entre o índice de cavitação  $\sigma$  e a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ . Este, inclusive, foi um dos critérios utilizados para definição do melhor posicionamento do sistema aerador na calha (quando necessário), e está apresentado no APÊNDICE B.

Outra maneira pode ser, por exemplo, por meio da avaliação conjunta entre os resultados de pressão e de  $C_b$ . Esse é um critério interessante de se adotar especialmente nas condições de aeração induzida, dado que, até o momento, não há um modelo de previsão capaz de estimar as profundidades do escoamento ao longo da calha nessas situações (portanto, não é possível o cálculo da velocidade do escoamento, necessária para estimativa do índice  $\sigma$ ).

Assim, tem-se aqui a análise conjunta entre  $C_b$  e as pressões sobre a calha, visando avaliar as prováveis zonas críticas à ocorrência de danos por cavitação. Esse método não tem o intuito de avaliar a intensidade dos danos – uma vez que estes são função também das características do concreto empregado na estrutura (GAL'PERIN et al., 1971) e do tempo em que o escoamento e a estrutura estão expostos ao fenômeno (GAL'PERIN et al., 1971; FALVEY, 1982), parâmetros estes que não são levados em conta na presente análise.

A Figura 5.33 apresenta a concentração de ar  $C_b$  estimada com base nos modelos de Matos (1999), Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , respectivamente (do mesmo modo como apresentado anteriormente, na Figura 5.25). Além disso, na Figura 5.33 também constam os valores de pressão extrema  $P_{0,1\%}$  (nas faces verticais dos degraus), conforme dados medidos na instalação experimental e transpostos para valores compatíveis a protótipo, considerando a escala geométrica 1:15. Na Figura 5.33, a vazão específica em escala de modelo está indicada por  $q$ , e em protótipo por  $q_p$ .

Quando  $P_{0,1\%}/\gamma < -10 \text{ m}^{67}$  e  $C_b < 0,07^{68}$ , tem-se uma região crítica não só quanto à ocorrência da cavitação, mas também quanto ao surgimento de danos oriundos desse fenômeno. Isso porque valores de pressão inferiores à pressão de vapor incitarão a ocorrência de cavitação e, ainda, caso a implosão das bolhas ocorra em regiões onde a concentração de ar no fundo é baixa (no caso,  $C_b < 0,07$ ), podem surgir danos importantes na estrutura. Assim, na Figura 5.33, as regiões onde  $P_{0,1\%}/\gamma < -10 \text{ m}$  e  $C_b < 0,07$  aparecem em destaque, com fundo vermelho.

<sup>67</sup> O que representa, aproximadamente, valores de pressão (relativa) abaixo da pressão de vapor, em termos de coluna piezométrica. Isso indicaria a possibilidade da ocorrência de cavitação no protótipo, de modo que não haveria presença de água (no estado líquido) na região. Tais valores devem ser entendidos unicamente como indicativos de que a região poderá estar exposta ao fenômeno da cavitação, mas não correspondem à pressão que ocorreria na realidade.

<sup>68</sup> Conforme conclusões de Peterka (1953), Capítulo 3.

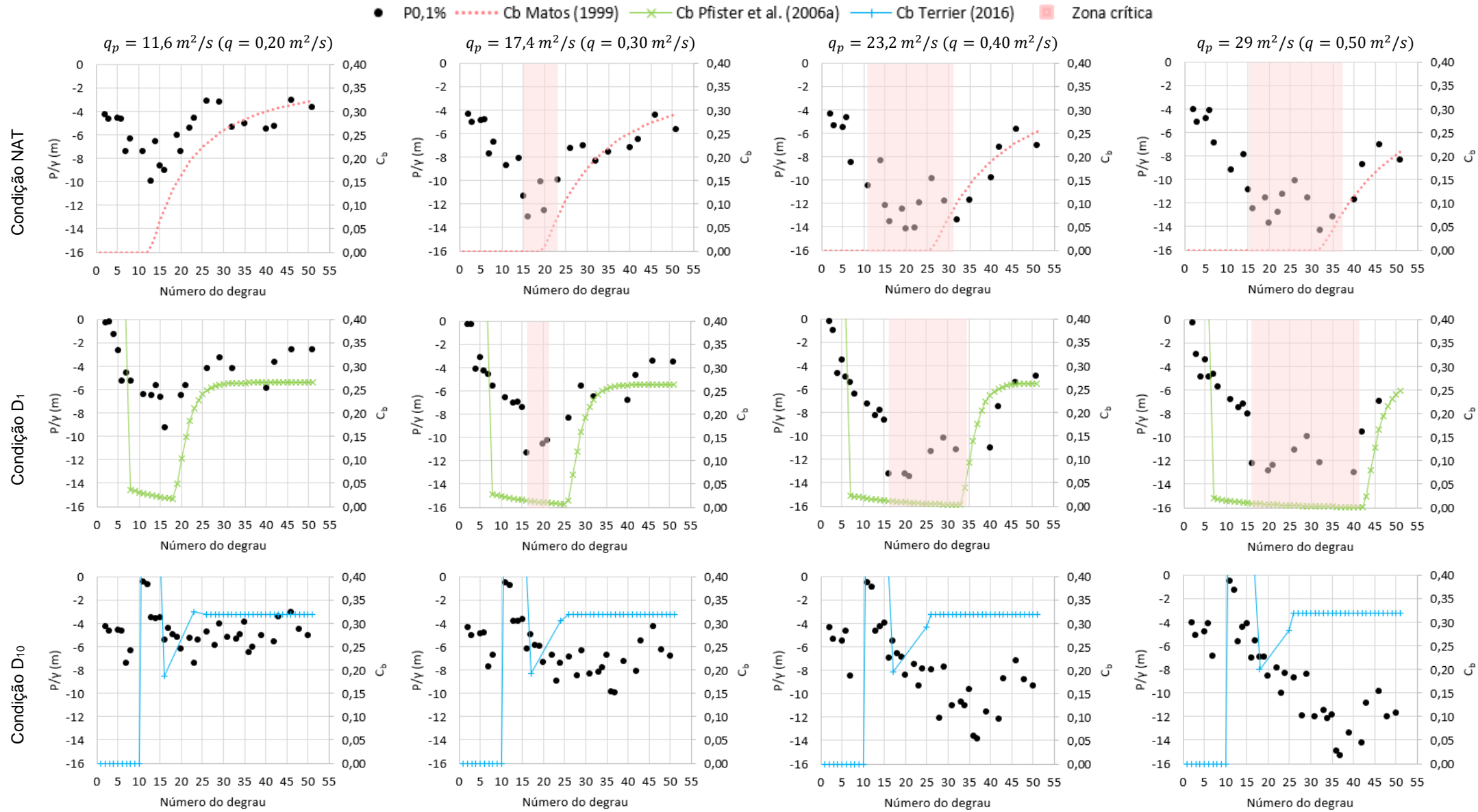


Figura 5.33 – Pressão  $P_{0,1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>. Os valores de pressão foram transferidos para a escala de protótipo considerando a escala geométrica 1:15 ( $h_d = 0,90 \text{ m}$  no protótipo).

Com base nos critérios mencionados, a análise da Figura 5.33 permite as seguintes observações:

- i. Os resultados associados à condição NAT indicam que, de modo geral, haverá risco de danos na região entre os degraus nº15 e nº35, quando  $17 \text{ m}^2/\text{s} \leq q_p \leq 29 \text{ m}^2/\text{s}$  (sendo  $q_p$  a vazão específica em escala de protótipo). Ou seja, a instalação de um aerador nas proximidades do degrau nº15 pode ser uma alternativa interessante, nesses casos;
- ii. Para a condição  $D_1$ , os resultados sugerem que, da mesma forma como na condição NAT, a região entre os degraus nº15 e nº40, aproximadamente, também estaria sujeita a danos quando  $17 \text{ m}^2/\text{s} \leq q_p \leq 29 \text{ m}^2/\text{s}$ . Ou seja, ainda que exista o aerador instalado (nesse caso, no degrau nº1), a quantidade de ar inserida no escoamento não foi suficiente para proteger a zona a jusante do degrau nº15;
- iii. Por fim, de acordo com os resultados da condição  $D_{10}$ , mesmo que ocorram pressões inferiores à pressão de vapor, a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  seria suficiente para proteger toda a calha, até mesmo quando  $q_p = 29 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Ou seja, enquanto nas condições NAT e  $D_1$  os resultados indicam que a calha estaria exposta a danos ainda quando  $q_p = 17 \text{ m}^2/\text{s}$ , na condição  $D_{10}$  não se verificam regiões críticas nem mesmo para  $q_p = 29 \text{ m}^2/\text{s}$ . Sendo assim, no caso de um protótipo com  $h_d = 0,90 \text{ m}$ , a adoção de um aerador nas proximidades do degrau nº10 permitiria um incremento nas vazões do escoamento (com segurança, sem riscos a danos por cavitação) da ordem de 70% em comparação com uma estrutura submetida à aeração natural, ou com o mesmo aerador instalado no primeiro degrau (condição  $D_1$ ).

Como já referido, a Figura 5.33 expõe resultados considerando  $P_{0,1\%}$  e escala geométrica de 1:15 entre o modelo (a instalação experimental) e o protótipo. Assim, as conclusões obtidas e expostas ao longo deste item estão associadas a esta escala geométrica (e também à consideração da pressão extrema  $P_{0,1\%}$  como critério mandatório). Contudo, no APÊNDICE K constam os resultados tendo também como critério as pressões  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ , além de escalas geométricas iguais a 1:10 e 1:20 (portanto, associadas a protótipos com  $h_d = 0,60 \text{ m}$  e  $h_d = 1,20 \text{ m}$ , respectivamente), com base nas mesmas diretrizes de construção da Figura 5.33. No referido apêndice apresentam-se conclusões mais amplas, associadas a todas as situações avaliadas.

Ainda, é importante apontar alguns resultados que, ao que tudo indica, parecem contraditórios. Na condição  $D_{10}$  os resultados obtidos pelo modelo de Terrier (2016) sugerem que a partir do degrau nº25, aproximadamente, já seria atingida a concentração de ar associada ao escoamento quase uniforme ( $C_{bu} \approx 0,32$ ), independentemente da vazão considerada. Ou seja, a partir desse ponto, as características do escoamento ao longo da calha seriam praticamente constantes. Porém, não é o que se observa quando são avaliados os valores medidos de pressão  $P_{0,1\%}$ , especialmente para as vazões em modelo  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Esse fato pode ser um indicativo de provável

inconsistência nos resultados de  $C_{bu}$  obtidos pela aplicação do método proposto por Terrier (2016), nessas condições. Mesmo assim, vale lembrar que o menor valor obtido pela aplicação do referido modelo ( $C_b \approx 0,20$ ) já é significativamente superior ao mínimo necessário para a não ocorrência de erosão por cavitação, como já mencionado. Então, ainda que o local de ocorrência de  $C_{bu}$  por Terrier (2016) não seja consistente, isso não altera as conclusões aqui obtidas.

Por fim, reitera-se que, mesmo que os casos avaliados estejam enquadrados, de modo geral, nos intervalos de validade indicados pelos autores, e que o aspecto visual do escoamento seja semelhante, apenas será possível validar a aplicabilidade dos modelos de previsão de  $C_b$  após a medição experimental da concentração de ar no modelo utilizado na presente pesquisa (em investigações futuras).

Neste item, para a identificação das zonas propícias à ocorrência de cavitação, optou-se pela consideração dos dados de pressão medidos nos ensaios. Em vez disso, no estabelecimento das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus, pode-se aplicar o modelo de previsão apresentado no item 5.5. No capítulo seguinte (Capítulo 6 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO PRÁTICA), adota-se essa abordagem.

## 6 EXEMPLO DE APLICAÇÃO PRÁTICA

Visando aplicação prática dos métodos e critérios propostos e apresentados ao longo da Tese, neste capítulo tem-se a solução de um exemplo associado à previsão e análise de parâmetros do escoamento sobre vertedouros em degraus com aeração induzida. A depender da etapa de solução, serão considerados tanto modelos que foram propostos ao longo deste trabalho (como para análise do coeficiente  $\beta$ , das pressões na condição de aeração induzida, dentre outros), quanto sugeridos por pesquisadores terceiros (como na avaliação do posicionamento do sistema aerador e de  $C_b$ ). Por fim, no item 6.6, tem-se um esquema resumo de equações e modelos aplicados à previsão de parâmetros do escoamento em vertedouros em degraus com aeração induzida, a exemplo do passo a passo utilizado neste exemplo prático.

Este exemplo hipotético considera os dados de entrada dispostos na Tabela 6.1 e representados esquematicamente na Figura 6.1. De posse da vazão do escoamento  $q_p$  e das características geométricas da estrutura (Tabela 6.1), calculam-se os parâmetros básicos do escoamento, como altura crítica  $h_c$  e número de Froude rugoso  $F_k$ , também apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Dados do exemplo de aplicação prática.

Dados geométricos da barragem e da calha em degraus	Altura da barragem (aprox.)	50 m
	$L_{ogiva}$ (ver Figura 6.1)	7,5 m
	$Z_{ogiva}$ (ver Figura 6.1)	4,5 m
	Inclinação da calha $\alpha$	1,0V:0,75H ( $\approx 53^\circ$ )
	Altura dos degraus $h_d$	0,90 m
	Nº de degraus (aprox.)	51
	Rugosidade $k$ (ver Figura 6.1)	0,54 m
Escoamento de água	Vazão específica $q_p$	25 m <sup>2</sup> /s
Considerações gerais	$P_{atm\ abs}$	10,33 m
	$P_{vapor\ abs}$ (a 20°C)	0,24 m
Parâmetros básicos do escoamento	Altura crítica $h_c$	3,99 m
	Parâmetro $F_k$ (Equação 3.13)	22,49
	Razão $h_c/h_d$	4,43

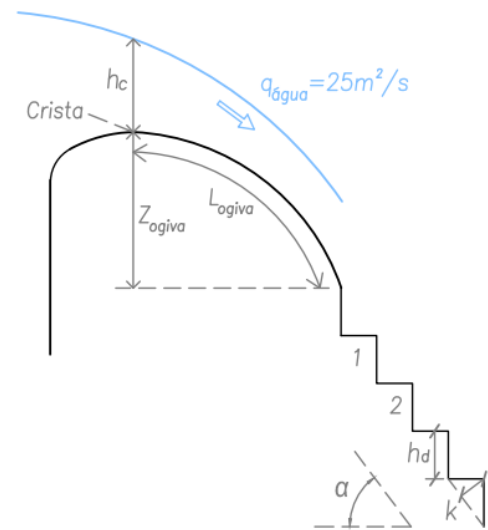


Figura 6.1 – Representação esquemática, em vista lateral, do vertedouro considerado no exemplo (fora de escala).

### 6.1 POSICIONAMENTO DO SISTEMA AERADOR

A avaliação da necessidade ou não de instalação do sistema aerador, bem como a escolha otimizada do seu posicionamento ao longo da calha, podem ser feitas de acordo com os métodos apresentados no APÊNDICE B, levando-se em conta o escoamento submetido à aeração natural. No caso deste exemplo, optou-se por utilizar um dos critérios indicados por Matos et al. (2022), que contempla a avaliação da velocidade crítica do escoamento  $V_c$  ao longo da calha, com base no uso



do coeficiente de pressão  $C_p$ , associado a pressões extremas negativas, na face vertical dos degraus. Para mais detalhes, ver APÊNDICE B.

A determinação do índice de cavitação do escoamento  $\sigma$  se dá pela Equação 6.1, considerando a pressão  $P$  como sendo hidrostática. Para determinação da velocidade do escoamento  $V$  ao longo da calha, é necessário conhecer a profundidade não aerada  $h$ . Para isso, a montante do ponto de início de aeração, utiliza-se a Equação 6.2 e, a jusante, a Equação 6.3 e a Equação 6.4, respectivamente, para  $h_c/h_d \leq 3$  e  $h_c/h_d > 3$ , em conformidade com Matos et al. (2022), com  $L'_{NAT}$  pela Equação 6.5. Por sua vez, calcula-se a localização ( $L_i$ ) e a profundidade do escoamento no ponto de início de aeração natural ( $h_i$ ), respectivamente, pela Equação 6.6 e Equação 6.7, de Meireles et al. (2012).

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\rho_w \frac{V^2}{2}} \quad \text{Equação 6.1}$$

$$\frac{h}{h_i} = 1,17 - 0,25 \frac{L_{NAT}}{L_i} + \frac{0,084}{L_{NAT}/L_i} \quad \text{Equação 6.2}$$

$$\frac{h}{h_i} = \frac{1}{\left\{ 1 + \left[ 21,338 - \frac{13,815}{(h_c/h_d)^2} \right]^{-1} L'_{NAT}{}^{1/2} \right\}} \quad \text{Equação 6.3}$$

$$\frac{h}{h_i} = 0,653 + 0,347 e^{-\frac{L'_{NAT}}{27,60}} \quad \text{Equação 6.4}$$

$$L'_{NAT} = \frac{(L_{NAT} - L_i)}{h_i} \quad \text{Equação 6.5}$$

$$\frac{L_i}{k} = 6,75 F_k^{0,76} \quad \text{Equação 6.6}$$

$$\frac{h_i}{k} = 0,35 F_k^{0,59} \quad \text{Equação 6.7}$$

A determinação do coeficiente de pressão  $C_p$  se dá pela Equação 6.8 (coeficientes na Tabela 6.2), ao passo que a velocidade crítica do escoamento  $V_c$ , associada aos diferentes coeficientes de pressão  $C_p$ , é calculada pela Equação 6.9. Tendo a velocidade crítica  $V_c$ , calcula-se o índice de cavitação crítico  $\sigma_c$  a ela associado, a partir da Equação 6.1.

$$C_p = \frac{a + bL'_{NAT}}{1 + cL'_{NAT} + dL'_{NAT}{}^2} \quad \text{Equação 6.8}$$

$$V_c = \sqrt{\frac{2g P_v/\gamma}{C_p}} \quad \text{Equação 6.9}$$

Tabela 6.2 – Coeficientes da Equação 6.8. Adaptado de Matos et al. (2022).

	a	b	c	d
$C_{p0,1\%}$	-0,6507	-0,0094	0,0421	0,0024
$C_{p1\%}$	-0,4210	-0,0072	0,0440	0,0024
$C_{p5\%}$	-0,2626	-0,0054	0,0459	0,0023

A aplicação do passo a passo descrito resultou na Figura 6.2, que apresenta o índice de cavitação do escoamento  $\sigma$  e os índices críticos  $\sigma_c$  ao longo da calha, associados às probabilidades de não excedência de pressões correspondentes a 0,1%, 1% e 5%, tanto em função do parâmetro de posição  $L'_{NAT}$  (Figura 6.2a) quanto em termos do número do degrau (Figura 6.2b). Na Figura 6.2 também está representada a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ , estimada pela Equação 3.7 de Matos (1999).

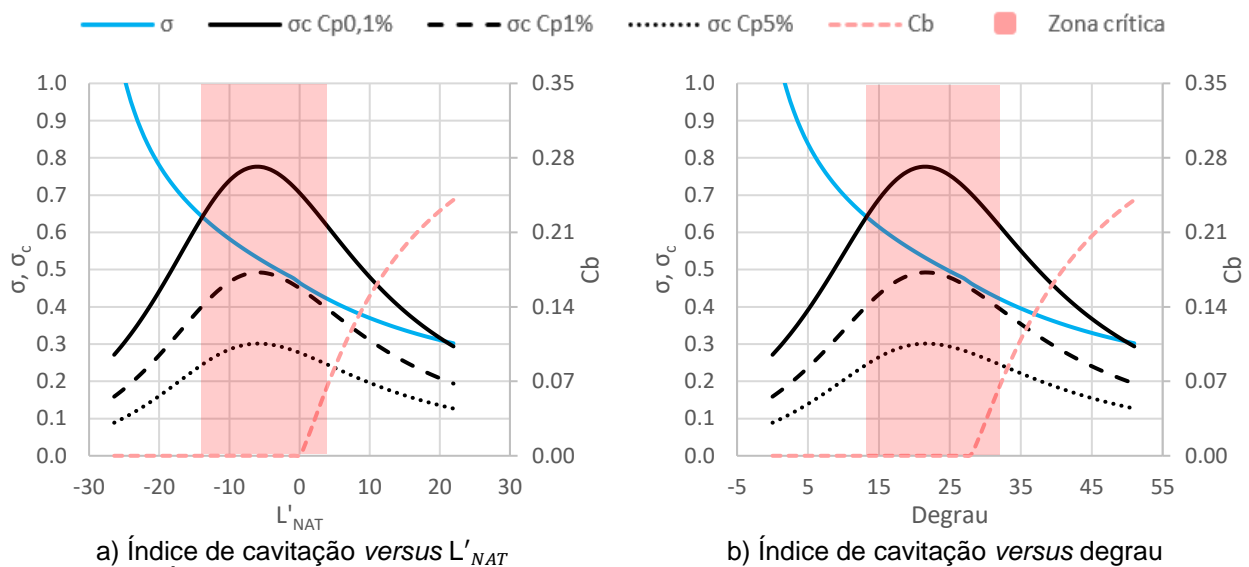


Figura 6.2 – Índice de cavitação ao longo da calha em função a) do parâmetro de posição  $L'_{NAT}$  e b) do número do degrau. Caso em que  $q_p = 25 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $F_k = 22,49$ .

Assumindo o critério mais conservador (portanto, associado à  $C_{p0,1\%}$ ), a zona onde  $\sigma < \sigma_c C_{p0,1\%}$  e  $C_b < 7\%$  – este último, conforme conclusões de Peterka (1953) – representa a região suscetível a danos por cavitação. Essa região tem início no degrau nº13, aproximadamente, e se estende até o degrau nº32, estando representada em destaque na Figura 6.2 (com preenchimento vermelho). Nesse caso, a montante do degrau nº13 os resultados indicam a não ocorrência da cavitação, ao passo que, a jusante do degrau nº32, embora haja chance de ocorrência do fenômeno, a calha estaria protegida dos seus efeitos danosos uma vez que  $C_b > 7\%$ .

Assim, na tentativa de se evitar os danos onde  $\sigma < \sigma_c C_{p0,1\%}$  e  $C_b < 7\%$ , conclui-se que um sistema aerador instalado nas proximidades do degrau nº13 pode ser uma opção interessante, em

conformidade com os critérios dispostos. Porém, deve-se ressaltar que, a depender da quantidade de ar inserida pelo sistema aerador (isto é, do coeficiente  $\beta$ ) e das características do escoamento a jusante do impacto do jato, a influência do aerador pode não se estender por todo o trecho crítico (entre os degraus nº13 e nº32). Ou seja, não necessariamente a instalação de um único aerador no degrau nº13 pode ser suficiente para proteger toda a zona crítica. Para responder a essa questão, deve-se analisar a concentração de ar no escoamento (característica avaliada no item 6.4).

## 6.2 PARÂMETROS DO ESCOAMENTO

Tendo sido verificada a necessidade de instalação de sistema aerador no degrau nº13 ( $D_{13}$ ), conforme item anterior, na sequência avaliam-se os parâmetros do escoamento associados a ele, a saber, o coeficiente de entrada de ar ( $\beta$ ) e o comprimento do jato ( $L_j$ ). Será considerado um sistema aerador composto por um defletor de altura  $t$  igual a 0,15 m e ângulo  $\theta = 7,6^\circ$ , com possibilidade de entrada de ar ao longo de toda a largura do vertedouro. A Figura 6.3 apresenta esquematicamente a condição avaliada.

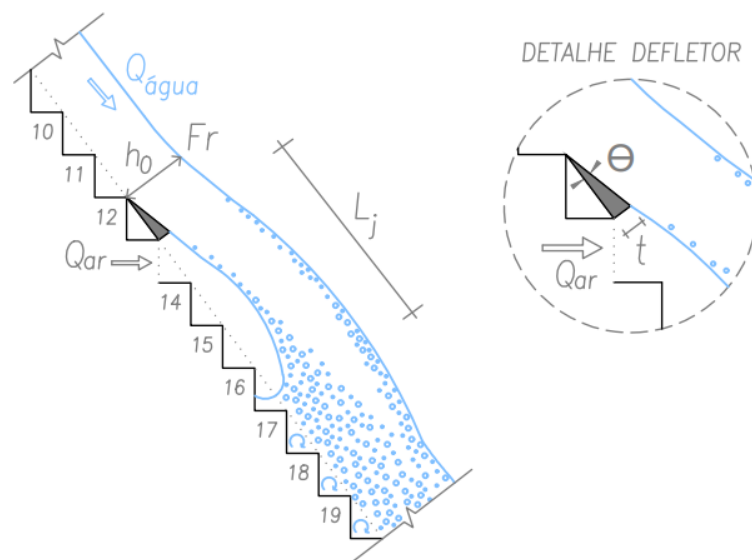


Figura 6.3 – Representação esquemática, em vista lateral, do sistema aerador avaliado (fora de escala).

A previsão do coeficiente  $\beta$  se deu pela aplicação da Equação 5.7 (item 5.3.3), com a profundidade do escoamento a montante do defletor  $h_0$  calculada pela Equação 5.1 (item 5.1.1). Já a estimativa do comprimento do jato  $L_j$  pode ser feita pela Equação 5.4, Equação 5.5 ou Equação 5.6 (considerando os modelos propostos no presente trabalho). A Tabela 6.3 apresenta os resultados obtidos pelo uso das referidas equações.

Como sugere a Tabela 6.3, a depender da equação selecionada para estimativa do parâmetro  $L_j$ , os resultados indicam a incidência do jato no degrau nº16 ou nº17, aproximadamente. Daqui em diante será dada sequência ao exemplo considerando o resultado de  $L_j$  proveniente da Equação 5.4 (isto é,  $L_j = 4,7$  m, com impacto do jato acontecendo no degrau nº17).

Tabela 6.3 – Parâmetros do escoamento associados ao sistema aerador.

Parâmetro avaliado	Equação utilizada	Resultado
$h_0$	Equação 5.1	1,39 m
$Fr_0$ (no defletor)	Equação 3.45 ( $L_{ref} = h_0$ )	4,86
Coeficiente $\beta$	Equação 5.7	4,1%
Comprimento do jato $L_j$ e degrau de impacto do jato (entre parênteses, aprox.)	Equação 5.4	4,7 m (impacto no D <sub>17</sub> )
	Equação 5.5	4,4 m (impacto no D <sub>17</sub> )
	Equação 5.6	3,9 m (impacto no D <sub>16</sub> )

Vale ressaltar que os parâmetros do escoamento associados a este exemplo estão em conformidade com os limites de validade das equações propostas, isto é,  $\alpha = 53,13^\circ$ ,  $3 \leq Fr_0 \leq 6$ ,  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,50$ ,  $\theta = 7,6^\circ$ .

### 6.3 DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES

A avaliação da distribuição das pressões na condição de aeração induzida pode ser feita com base no modelo de previsão de pressões proposto no item 5.5. Em resumo, a distribuição de pressões segue a Equação 6.10, de modo que o parâmetro  $\Omega$  pode ser estimado pela Equação 6.11 (coeficientes informados na Tabela 5.7) e Equação 6.12 (coeficientes informados na Tabela 5.8), respectivamente, na face vertical e horizontal dos degraus, com  $L'$  conforme Equação 6.13.

$$\Omega = \frac{P}{\rho_w g} h_d \frac{h_c}{Z^3} Fr_0^2 \quad \text{Equação 6.10}$$

$$\Omega_{face\ vertical} = \frac{a}{1 + be^{cL'}} \quad \text{Equação 6.11}$$

$$\Omega_{face\ horizontal} = \frac{a + bL'}{1 + cL' + dL'^2} \quad \text{Equação 6.12}$$

$$L' = \frac{(L - L_j)}{h_c} \quad \text{Equação 6.13}$$

Conforme Tabela 5.7 e Tabela 5.8, os coeficientes das equações variam a depender da condição considerada: se levados em conta apenas os dados da condição D<sub>1</sub> ou D<sub>10</sub>, de forma independente, ou os dados de ambas as condições em conjunto (D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>). No caso deste exemplo, foram considerados os coeficientes associados aos dados das condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub> em conjunto. Contudo, como alternativa, se poderia considerar o ajuste obtido com os dados da condição D<sub>10</sub> apenas – por se tratar de uma condição mais próxima da aqui avaliada (aerador do degrau nº13). Essa escolha é compromisso do usuário, com base na análise de cada caso em especial e na necessidade ou não da adoção de critérios mais conservadores.

A Figura 6.4 apresenta o resultado da aplicação do modelo mencionado (para as faces vertical e horizontal do degrau). No eixo das abscissas considera-se tanto o parâmetro de posição  $L'$  (Figura

6.4a e Figura 6.4b) quanto o nº do degrau (Figura 6.4c e Figura 6.4d). A Figura 6.4c e a Figura 6.4d apresentam os resultados de pressão a contar do degrau nº17 uma vez que, como apresentado no item anterior, é neste degrau que ocorre o impacto do jato.

No caso deste exemplo foram explorados apenas os resultados associados às pressões extremas negativas na face vertical ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ) e positivas na face horizontal ( $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ). Mas, há também a alternativa de se avaliar as pressões médias  $P_{med}$  e o desvio padrão das pressões  $P_{\sigma}$  (conforme item 5.5).

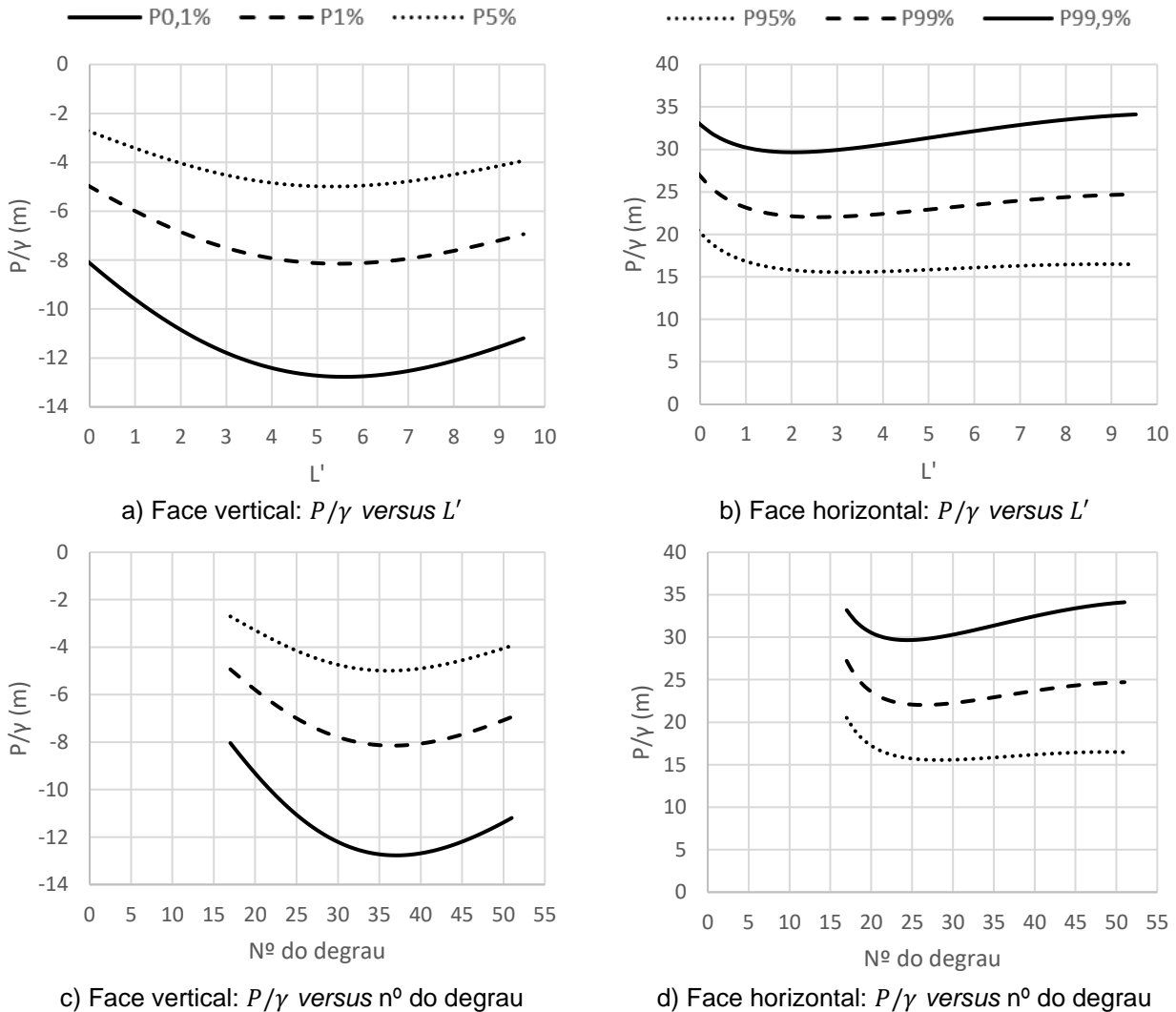


Figura 6.4 – Distribuição das pressões extremas ao longo da calha, nas faces vertical (a, c) e horizontal (b, d) do degrau.

Como sugere a Figura 6.4, em termos de altura de coluna piezométrica ( $P/\gamma$ , em m), as pressões mínimas observadas (associadas à  $P_{0,1\%}$  na face vertical dos degraus) são inferiores a -12 m, ao passo que as pressões máximas (associadas à  $P_{99,9\%}$  na face horizontal) superam 30 m. Vale ressaltar que a obtenção de valores de pressão inferiores à pressão de vapor da água ( $\leq -10$  m, aproximadamente, em termos de pressão relativa) indica que a região poderá estar exposta ao fenômeno da cavitação. Consequentemente, quando  $P/\gamma \leq -10$  m (aproximadamente) não haveria a presença de água (no estado líquido) nessa região. Sendo assim, a obtenção de valores de

pressão inferiores à pressão de vapor da água deve ser interpretada apenas como indicativo da ocorrência de cavitação, não correspondendo à pressão que ocorreria na realidade.

Assim, de acordo com a Figura 6.4, as pressões mínimas obtidas são inferiores à pressão de vapor da água. Contudo, ainda que isso seja um indicativo da ocorrência de cavitação, não prova necessariamente o surgimento de danos associados ao fenômeno. Isso porque, conforme apresentado no item 3.3, a presença de ar no escoamento (em quantidades suficientes) pode reduzir ou até evitar a ocorrência de danos. A avaliação da concentração de ar no escoamento é abordada no item a seguir (item 6.4).

Por fim, a título de comparação, a Figura 6.5 apresenta tanto as pressões do escoamento obtidas na condição de aeração induzida (com sistema aerador posicionado no degrau nº13, conforme Figura 6.4, condição “D<sub>13</sub>”), quanto as pressões que seriam observadas na condição de aeração natural (NAT). As pressões na condição de aeração natural foram calculadas com base no modelo proposto por Matos et al. (2022), apresentado no item 3.1.2. Nesse caso, estão sendo consideradas apenas as pressões extremas mínimas na face vertical dos degraus (isto é,  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ).

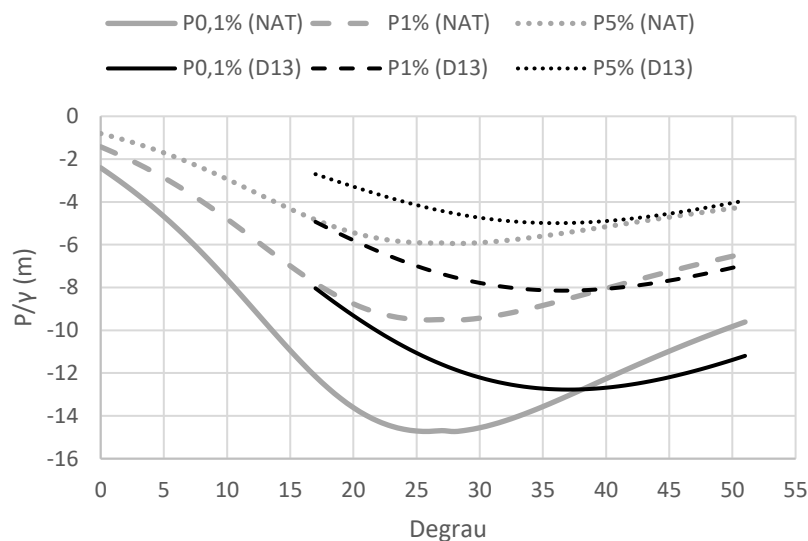


Figura 6.5 – Distribuição das pressões do escoamento ao longo da calha, na face vertical dos degraus, nas condições de aeração natural (NAT, em cinza) e induzida com aerador no degrau nº13 (D<sub>13</sub>, em preto).

De acordo com a Figura 6.5 e com os modelos utilizados, nota-se que na condição NAT as pressões mínimas atingidas pelo escoamento são cerca de 15 a 20% menores (mais negativas) do que as atingidas na condição D<sub>13</sub>, independentemente da probabilidade associada (0,1%, 1% ou 5%). Deve-se ressaltar que o resultado da condição de aeração induzida é influenciado pelo posicionamento do sistema aerador ao longo da calha (ver Equação 6.10, o parâmetro  $Fr_0$  diz respeito ao escoamento na entrada do sistema aerador). Sendo assim, os resultados apresentados na Figura 6.5 são válidos unicamente para o exemplo aqui desenvolvido, com sistema aerador posicionado no degrau nº13, não devendo ser interpretados de forma generalizada. Isso é, não

necessariamente as pressões na condição de aeração natural serão sempre 15 a 20% inferiores às da condição de aeração induzida.

#### 6.4 ANÁLISE DA CONCENTRAÇÃO DE AR

Em escoamentos submetidos à aeração natural, a estimativa da concentração de ar junto aos degraus (no fundo do escoamento,  $C_b$ ) pode ser feita pela aplicação do modelo de previsão sugerido por Matos (1999) e, na aeração induzida, podem ser utilizados os modelos de Pfister et al. (2006a) ou Terrier (2016), a depender do aspecto do escoamento, como já mencionado no item 5.6.

No caso deste exemplo, o sistema aerador está posicionado no degrau nº13 ( $D_{13}$ ). Assim, a montante dessa região, o escoamento estará submetido à aeração natural e, portanto, utiliza-se o modelo de Matos (1999) na estimativa de  $C_b$ . A jusante do  $D_{13}$  será considerado o modelo de Terrier (2016) visto que, conforme as condições avaliadas no presente trabalho, é mais provável que o escoamento a jusante do  $D_{13}$  esteja mais próximo do observado por Terrier (2016) do que por Pfister et al. (2006a).

A estimativa da concentração de ar  $C_b$  por Terrier (2016) se dá pela aplicação da Equação 3.39 até a Equação 3.44 (como exposto no item 3.4.3). Com base nos resultados obtidos nos itens anteriores, a Tabela 6.4 traz um compilado dos principais parâmetros necessários à estimativa de  $C_b$ , juntamente com o intervalo de validade das equações de previsão indicadas por Terrier (2016). Deve-se atentar que, como sugere a Tabela 6.4, o valor associado à razão  $t/h_0$  deste exemplo não está inserido no intervalo indicado por Terrier (2016) – do mesmo modo como boa parte dos casos avaliados no presente trabalho, como já apresentado na Tabela 5.9 e discutido no item 5.6. De qualquer forma, esse fato parece não impactar nas conclusões obtidas, como será discutido adiante.

Tabela 6.4 – Principais parâmetros para estimativa de  $C_b$  por Terrier (2016) e intervalo de validade indicado pelo autor.

Parâmetro	Valor deste exemplo	Validade Terrier (2016)
$Fr_0$	4,86	$3,2 \leq Fr_0 \leq 7,5$
$h_d/h_0$	0,65	$0,65 \leq h_d/h_0 \leq 1,15$
$t/h_0$	0,11	$0,16 \leq t/h_0 \leq 0,60$

A Figura 6.6 apresenta a distribuição das pressões extremas (nesse caso, de  $P_{0,1\%}$ ), na face vertical dos degraus, nas condições de aeração natural e induzida, respectivamente, conforme modelos de previsão de Matos et al. (2022) e também do proposto no presente trabalho (conforme resultados dispostos no item 6.3). Além disso, na Figura 6.6 também constam os resultados de  $C_b$  com base nos critérios recém mencionados.

Até o degrau nº13, estando a estrutura submetida a escoamento com aeração natural, pelo modelo de Matos et al. (2022) a pressão mínima atingida não ultrapassa -10 m (pressão em termos de coluna piezométrica), mas está próxima disso na região do degrau nº13, local onde o sistema

aerador foi posicionado. Esse fato parece reforçar a coerência na adoção do modelo de Matos et al. (2022) na determinação da posição ideal do sistema aerador ao longo da calha (item 6.1). Já com relação à concentração de ar  $C_b$ , até o degrau nº13 não há ar no fundo do escoamento, apenas água (assim,  $C_b = 0$ ). Isso porque o escoamento não atingiu o ponto de início de aeração natural, que, conforme equação de Meireles et al. (2012) – Equação 4.3, ocorreria no degrau nº28, aproximadamente.

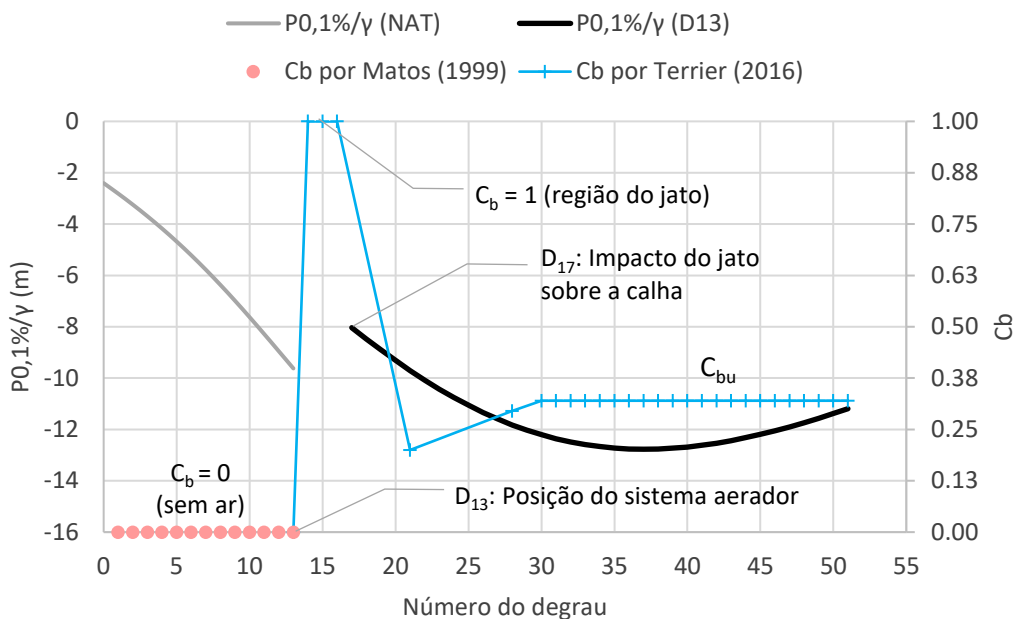


Figura 6.6 – Distribuição das pressões extremas  $P_{0,1\%}$  na face vertical dos degraus, conforme item 6.3, e da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  (junto aos degraus).

A partir do degrau nº13 o escoamento estará submetido à aeração induzida. Desse modo, a partir do ponto de impacto do jato sobre os degraus (que ocorre no degrau nº17), a distribuição das pressões segue o modelo proposto no presente trabalho (conforme já apresentado no item 6.3), ao passo que a estimativa de  $C_b$  segue o modelo de Terrier (2016). Nesse caso, o método sugere que o valor mínimo de  $C_b$  ocorrerá nas proximidades do degrau nº21 e que o escoamento estará submetido à  $C_{bu} \approx 0,32$  a partir do degrau nº30. Porém, não é o que parece ocorrer quando são avaliados os resultados de pressão na Figura 6.6, dado que a distribuição de pressões ainda não alcançou um padrão uniforme ao longo do comprimento da calha. Esse fato também foi identificado e discutido ao longo do item 5.6.3.

Por fim, levando em conta o mesmo critério utilizado no item 5.6.3 para o estabelecimento das zonas críticas à ocorrência de erosão por cavitação ao longo da calha em degraus (isto é,  $P_{0,1\%}/\gamma < -10 \text{ m}$  e  $C_b < 0,07$ ), percebe-se, pela Figura 6.6, que nenhuma região estaria exposta a danos.

Com isso, finalmente, pode-se concluir que o sistema aerador foi posicionado em local adequado e que, a jusante do aerador, embora as pressões mínimas extremas excedam o valor limite à



ocorrência de cavitação (o que, provavelmente, incitará a ocorrência do fenômeno), a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  será suficiente para proteger a estrutura da possível erosão consequente.

## 6.5 ADICIONAL: AVALIAÇÃO DE OUTRA GEOMETRIA DE AERADOR

Adicionalmente ao que já foi apresentado ao longo deste capítulo, este item expõe os resultados que seriam obtidos na hipótese de adotar-se um sistema aerador de geometria diferente da escolhida anteriormente. Neste caso, adota-se um aerador composto por defletor com altura  $t = 0,30 \text{ m}$  e com comprimento equivalente a duas hipotenusas de degrau, como ilustrado na Figura 6.7. Assim, o ângulo do defletor  $\theta$  é idêntico ao utilizado anteriormente ( $\theta = 7,6^\circ$ ), o que garante a validade na aplicação das equações de previsão de pressão propostas.

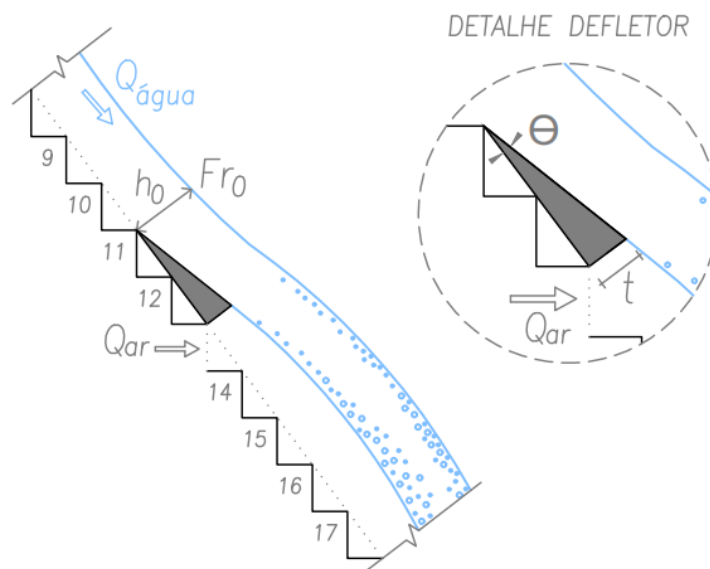


Figura 6.7 – Representação esquemática, em vista lateral, do sistema aerador alternativo avaliado (fora de escala).

Como ilustra a Figura 6.7, o defletor inicia no degrau nº11, mas a entrada de ar continua ocorrendo no degrau nº13. A Tabela 6.5 apresenta os principais parâmetros do escoamento associados ao sistema aerador adotado neste caso. Diferentemente do caso anterior, neste exemplo a relação  $t/h_0$  resultante está inserida no intervalo de validade das equações indicadas por Terrier (2016) – que, conforme apresentado na Tabela 6.4, vale  $0,16 \leq t/h_0 \leq 0,60$ .

Como indica a Tabela 6.5, a adoção de um defletor de maior altura  $t$  impacta diretamente no aumento do coeficiente  $\beta$  do escoamento e também do comprimento do jato  $L_j$ , que possui cerca de 11 m, com impacto no degrau nº21, aproximadamente.

Tabela 6.5 – Parâmetros do escoamento associados ao sistema aerador alternativo.

Parâmetro	Equação utilizada	Resultado
$h_0$	Equação 5.1	1,43 m
$Fr_0$ (no defletor)	Equação 3.45 ( $L_{ref} = h_0$ )	4,67
Coeficiente $\beta$	Equação 5.7	8,3%
Comprimento do jato $L_j$ e degrau de impacto do jato (entre parênteses, aprox.)	Equação 5.4	11,1 m (impacto no D <sub>21</sub> )
	Equação 5.5	10,4 m (impacto no D <sub>20</sub> )
	Equação 5.6	10,8 m (impacto no D <sub>21</sub> )
	Média	10,8 m (impacto no D <sub>21</sub> )
$h_d/h_0$	-	0,63
$t/h_0$	-	0,21

A Figura 6.8 expõe os resultados associados à distribuição das pressões extremas  $P_{0,1\%}$  e também de  $C_b$ , para o defletor com  $t = 0,30$  m, com base nos mesmos critérios de construção da Figura 6.6 (anteriormente introduzida). Os resultados oriundos da aplicação do modelo de previsão de Terrier (2016) indicam valor mínimo de  $C_b$  no degrau nº26 (onde  $C_b \approx 0,22$ ), valor máximo no degrau nº40 ( $C_b \approx 0,35$ ) e valores uniformes a partir do degrau nº49 ( $C_{bu} \approx 0,32$ ), aproximadamente. Assim, quando comparado este resultado com os valores de pressão, o local associado à ocorrência de  $C_{bu}$  parece mais coerente agora, do que no caso do defletor anteriormente considerado (onde  $t = 0,15$  m). Isso porque, como sugerem os resultados de pressão, o escoamento aparentemente não deve atingir o regime quase uniforme no trecho – e, como indicou o modelo de Terrier (2016),  $C_{bu}$  ocorreria somente nos últimos degraus da calha, diferentemente dos resultados obtidos com o defletor anteriormente sugerido (ver Figura 6.6).

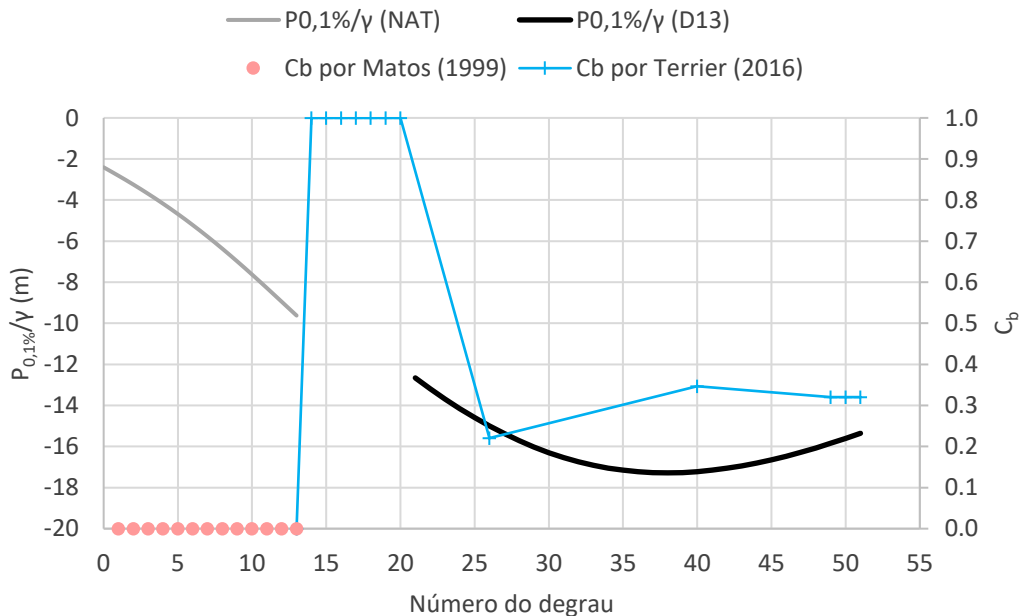


Figura 6.8 – Distribuição das pressões extremas  $P_{0,1\%}$  na face vertical dos degraus, e da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  (junto aos degraus), considerando sistema aerador alternativo.

Assim como na situação anterior, os resultados indicam que a estrutura não estaria sujeita a danos, visto que, ainda que ocorram pressões negativas significativas ( $P/\gamma < -10 m$ ), a concentração de ar no fundo do escoamento seria suficiente para proteger a estrutura da provável erosão.

É possível que os resultados de  $C_b$  para  $t = 0,30 m$  sejam mais coerentes do que no caso anterior (onde  $t = 0,15 m$ ), visto que, agora, a razão  $t/h_0$  obedece ao intervalo de validade de Terrier (2016). De qualquer forma, reforça-se que o valor mínimo obtido pelo referido modelo (isto é,  $C_b \approx 0,20$  a  $0,22$ ), para ambos os defletores avaliados (seja  $t = 0,15 m$  ou  $t = 0,30 m$ ), já é cerca de três vezes superior ao mínimo indicado por Peterka (1953) para a proteção do concreto contra a erosão por cavitação. Vale destacar, ainda, que quanto maior a razão  $t/h_0$ , maior é o valor associado ao mínimo de  $C_b$ , conforme Equação 3.39. Então, ainda que no caso anterior (para  $t = 0,15 m$ ) a razão  $t/h_0$  não estivesse contemplada no intervalo de validade sugerido por Terrier (2016), as conclusões obtidas não seriam impactadas e estariam, ademais, favoráveis à segurança.

## 6.6 PASSO A PASSO PARA APLICAÇÃO PRÁTICA

1

Verificação da necessidade e da posição otimizada do sistema aerador ao longo da calha:

APÊNDICE B

Critério 1: Índice  $\sigma$  x Índices críticos  $\sigma_c$  da literatura

Critério 2: Método de Matos et al. (2022)

Se, a partir do resultado indicado em “1”, for necessária a instalação de sistema aerador na calha em degraus, então, segue para “2, 3 e 4”:

2

Parâmetros do escoamento com sistema aerador

Profundidade do escoamento na entrada do defletor  $h_0$ : item 5.1.1

Comprimento do jato: item 5.2.1

Coeficiente de entrada de ar  $\beta$ : item 5.3.3

O critério varia a depender da posição do sistema aerador:

Se logo a jusante da ogiva: assumir a igualdade entre as energias na crista (crítica) e no defletor, para estimativa de  $h_0$

Se mais a jusante da ogiva: Equação 5.1

3

Distribuição das pressões: item 5.5

Distribuição geral: conforme Equação 5.9

Parâmetro de pressão nas faces verticais dos degraus: Equação 5.11, coeficientes da Tabela 5.7

Parâmetro de pressão nas faces horizontais dos degraus: Equação 5.12, coeficientes da Tabela 5.8

4

Concentração de ar no fundo do escoamento (junto aos degraus)  $C_b$ : item 5.6

Trecho com escoamento submetido à aeração natural  
Matos (1999) – Equação 3.7

Trecho com escoamento submetido à aeração induzida

Varia a depender do aspecto e evolução da *blackwater*:

Se a *blackwater* é bem definida e se estende a jusante do ponto de impacto do jato

Pfister et al. (2006a) – Equação 3.36 até Equação 3.38

Se a *blackwater* existe apenas ao longo do jato (ou termina logo a jusante dele)

Terrier (2016) – Equação 3.39 até Equação 3.44

Vale lembrar que, para a obtenção de resultados coerentes e com critério, o usuário também deve se certificar de que o caso avaliado está contemplado nos intervalos de validade das equações mencionadas, conforme exposto nos itens respectivos.

## 7 CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho é contribuir na compreensão do comportamento das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus e da entrada de ar no escoamento, considerando a instalação de sistema aerador em diferentes regiões ao longo da calha de um vertedouro em degraus, além de avaliar características gerais do escoamento nessas condições.

Para isso, considerou-se estudo experimental em modelo físico de vertedouro em degraus (com 6 cm de altura cada um), distribuídos ao longo de uma calha com  $53^\circ$  de inclinação com relação ao plano horizontal. O sistema aerador é formado por uma câmara de ar e um defletor. A câmara de ar se constituiu por uma abertura na face vertical de um degrau, ao longo de toda a largura da calha. O defletor possui ângulo de  $7,6^\circ$  com relação ao pseudofundo da calha em degraus. A medição das pressões hidrodinâmicas sobre as faces vertical e horizontal dos degraus foi feita por meio de transdutores de pressão, ao passo que a medição da entrada de ar no sistema aerador se deu por sonda Pitot-Prandtl acoplada a um transmissor diferencial de pressão.

Nas condições de aeração induzida, o sistema aerador foi posicionado nos degraus  $n^{\circ}1$  e  $n^{\circ}10$  da calha (de forma independente), resultando nas aqui nomeadas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , respectivamente. Para permitir a comparação entre diferentes configurações, também foram contemplados ensaios na condição de aeração natural no escoamento (condição NAT).

Neste capítulo apresentam-se as principais conclusões obtidas no trabalho, subdivididas em conformidade com os tópicos que foram explorados no Capítulo 5, bem como recomendações para investigações futuras (no item 7.8).

### 7.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS – $Fr$ , $Re$ , $We$

Os principais parâmetros adimensionais característicos do escoamento de água à superfície livre são representados, principalmente, por  $Fr$ ,  $Re$  e  $We$ . Tendo sido selecionado o modelo de semelhança de Froude na modelagem física da estrutura associada ao presente trabalho, os efeitos de escala proporcionados pela não semelhança de  $Re$  e  $We$  devem ser passíveis de ser desprezados.

Nos ensaios da condição NAT, casos onde a vazão específica  $q$  é inferior a  $0,10 \text{ m}^2/\text{s}$  estão submetidos a efeitos de escala não desprezáveis, uma vez que não respeitam os limites mínimos de  $Re \approx 1 \times 10^5$  e  $We_i \approx 100$ , conforme recomendações de Boes e Hager (2003b) e Amador (2005).

Já nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , é possível que casos em que a vazão específica  $q$  é inferior a  $0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  sejam influenciados por efeitos de escala relevantes quanto às forças de tensão superficial, dado que, nesses casos,  $We_0 < 100$ . Além destes, casos onde  $q < 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$  podem estar sujeitos a

efeitos de escala associados às forças viscosas, uma vez que  $Re < 1 \times 10^5$ , conforme indicações constantes em Pfister e Hager (2010a).

Assim, pode-se concluir que grande parte dos resultados obtidos neste trabalho não está sujeita a efeitos de escala importantes associados aos efeitos viscosos e de tensão superficial, especialmente no que diz respeito à avaliação da distribuição das pressões ao longo da calha (uma vez que, nesses casos, foram considerados apenas ensaios onde  $q \geq 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ , conforme Tabela 4.2). Já na avaliação do coeficiente de entrada de ar  $\beta$ , recomenda-se cautela na utilização dos resultados aqui obtidos especialmente quando  $q < 0,10 \text{ m}^2/\text{s}$ . Importante destacar que, conforme Chanson (2009) e Pfister e Hager (2010a), os resultados de modelo físico subestimam a quantidade de entrada de ar se comparados aos valores que ocorrem em protótipo. Desse modo, no que diz respeito à capacidade de entrada de ar no sistema aerador, os resultados do modelo serão favoráveis à segurança.

Finalmente, quando da transposição dos resultados aqui apresentados para a escala de protótipo, reitera-se a importância na adoção de escalas geométricas máximas da ordem de 1:15 a 1:25 ( $h_d = 0,90 \text{ m}$  a  $1,50 \text{ m}$ ), entre modelo e protótipo, conforme recomendações de Volkart e Rutschmann (1984), Boes e Hager (2003b), entre outros.

## 7.2 REGIÕES E PONTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO

A identificação de regiões e dos principais pontos característicos no escoamento foi realizada por meio de análise visual do fenômeno, observado em cada uma das configurações analisadas (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ), tanto durante os ensaios quanto posteriormente, com auxílio de registros em vídeo e fotografia.

O aspecto visual geral do escoamento na condição  $D_1$  é o mesmo que o identificado por Novakoski et al. (2020) e Novakoski (2021) – visto que se tratam dos mesmos ensaios dos referidos autores – sendo muito semelhante, também, com o que foi observado por Pfister et al. (2006a). Já na condição  $D_{10}$ , o aspecto visual do escoamento é muito semelhante ao identificado por Terrier (2016).

Nas condições de aeração induzida, o aspecto do escoamento no impacto do jato sobre os degraus foi distinto. Na condição  $D_1$  foi possível visualizar um jato íntegro, formado quase que exclusivamente por água. Já na condição  $D_{10}$ , o jato adquire aspecto “fragmentado”, com geratriz inferior sendo formada por uma mistura ar-água. Este fato pode estar associado à maior velocidade do escoamento na condição  $D_{10}$ , em comparação à condição  $D_1$ , na região do defletor, o que favorece a entrada de ar em maiores quantidades pelo sistema aerador e a maior incorporação de ar na água.

Foram propostas equações de ajuste para previsão do comprimento do jato formado a jusante do defletor (Equação 5.4, Equação 5.5 e Equação 5.6,  $R^2 = 0,99$ ), em função de parâmetros do

escoamento (como  $h_0$ ,  $Fr_0$  e  $Z_0$ ), bem como de características geométricas do aerador ( $t$ ), sendo válidas para calhas inclinadas com ângulo  $\alpha = 53,13^\circ$ ,  $3 \leq Fr_0 \leq 6$ ,  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,50$  e defletor com ângulo  $\theta = 7,6^\circ$ .

O comprimento da *blackwater* foi significativamente distinto nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Enquanto na condição  $D_{10}$  o final da *blackwater* ocorre ao longo do desenvolvimento do jato, ou muito próximo do impacto deste, na condição  $D_1$  a *blackwater* se estende muito além do final do jato. Assim, na condição  $D_1$ , há um trecho considerável da calha em que a aeração inferior (abaixo da *blackwater* e, portanto, em contato com os degraus) é proveniente apenas do ar inserido pelo sistema aerador. Já na condição  $D_{10}$ , o ar em contato com a estrutura em degraus é proveniente da combinação entre a aeração inferior (abaixo da *blackwater*, proveniente do sistema aerador) e superior (proveniente da superfície) já nas proximidades do impacto do jato. Isso evidencia a importância de se definir, de modo criterioso, o posicionamento do sistema aerador ao longo da calha.

### 7.3 COEFICIENTE DE ENTRADA DE AR $\beta$

Conforme esperado, o coeficiente  $\beta$  tem relação com o número de Froude do escoamento na entrada do defletor  $Fr_0$ . Considerando a mesma vazão ensaiada, a configuração  $D_{10}$  resultou em maiores coeficientes  $\beta$  do que a configuração  $D_1$ .

A subpressão sob o jato ( $\Delta p$ ) foi estimada pelas pressões médias medidas a jusante do sistema aerador. Os resultados indicam que tais pressões estão muito próximas da pressão atmosférica, o que sugere que  $\Delta p$  não interfere nos fenômenos analisados, tendo sido desprezado aqui.

Considerando os dados das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , propõe-se a relação apresentada na Equação 5.7 ( $R^2 = 0,97$ ) para estimativa do coeficiente  $\beta$ , função, dentre outros, de  $Fr_0$  e de características geométricas do sistema aerador. A referida equação é válida para calhas inclinadas com ângulo  $\alpha = 53,13^\circ$ ,  $3 \leq Fr_0 \leq 6$ ,  $0,07 \leq t/h_0 \leq 0,50$  e defletor com ângulo  $\theta = 7,6^\circ$ .

### 7.4 DISTRIBUIÇÃO DAS PRESSÕES SOBRE OS DEGRAUS

Foram analisados os parâmetros estatísticos das pressões médias ( $P_{med}$ ) e do desvio padrão das pressões ( $P_\sigma$ ) sobre as faces verticais e horizontais dos degraus. Além disso, foram avaliadas as pressões extremas negativas e positivas, associadas às probabilidades de não excedência de 0,1%, 1% e 5% (no caso das faces verticais,  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ) e de 95%, 99% e 99,9% (nas faces horizontais,  $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ).

Os valores de  $P_{med}$  nas configurações  $D_1$  e  $D_{10}$  são semelhantes aos da configuração NAT, com exceção da região compreendida entre o lançamento e o impacto do jato. As faces horizontais estão sujeitas a maiores valores de pressão do que as faces verticais, em conformidade com o observado

por Sánchez-Juny et al. (2007, 2008), entre outros, que consideraram escoamentos sujeitos apenas à aeração natural.

Levando em conta apenas as condições  $D_1$  e NAT, os parâmetros estatísticos avaliados em ambas as condições sugerem resultados muito semelhantes, com exceção do trecho entre o lançamento e impacto do jato, na condição  $D_1$ . Esse mesmo comportamento já foi também destacado por, dentre outros, Novakoski (2021).

Na condição  $D_1$ , o ponto de impacto do jato é representado por um pico expressivo nos valores dos parâmetros estatísticos  $P_{med}$ ,  $P_\sigma$  e  $P_{99,9\%}$ , principalmente na face horizontal dos degraus. Esse pico não é observado na condição  $D_{10}$ . Essa distinção pode ser explicada devido às diferenças identificadas visualmente no aspecto do jato entre  $D_1$  e  $D_{10}$ : enquanto na condição  $D_1$  o jato é íntegro e formado quase que exclusivamente por água, na condição  $D_{10}$  o jato tem aspecto “fragmentado” e é formado pela mistura ar-água, principalmente.

Para o caso das faces verticais, os parâmetros estatísticos  $P_\sigma$ ,  $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$  na condição  $D_{10}$  apresentaram comportamento distinto das outras duas condições (NAT e  $D_1$ ): há uma região de transição, após o impacto do jato nos degraus, até que os resultados da condição  $D_{10}$  alcancem o comportamento apresentado pelos resultados das outras duas condições (NAT e  $D_1$ ).

Como já destacado, os valores de  $P_{med}$  nas configurações  $D_1$  e  $D_{10}$  são semelhantes aos da configuração NAT, o que, de certa forma, contraria o esperado se levadas em conta as conclusões de Peterka (1953) e Dong e Su (2006). Esses autores identificaram que, com o aumento da concentração de ar no escoamento, houve também o aumento nas pressões médias. Assim, poderia se supor que as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  resultassem em pressões médias superiores às da condição NAT (visto que as primeiras são caracterizadas por quantidades adicionais de ar, em comparação à segunda). Mas, não foi o observado.

Contudo, vale salientar que, quando avaliados os resultados de  $P_{0,1\%}$  para diferentes coeficientes  $\beta$ , identificou-se o aumento das pressões com o aumento de  $\beta$  (APÊNDICE A). Ou seja, aparentemente, considerando escoamentos à superfície livre, há uma quantidade mínima de ar necessária para que seja observado aumento no valor da pressão do escoamento sobre a estrutura. Já no caso de escoamento em conduto forçado, possivelmente, a variação nas pressões é mais expressiva, mesmo quando a concentração de ar é baixa. Isso porque, conforme observado por Peterka (1953) e Dong e Su (2006), houve aumento expressivo nas pressões até mesmo quando a concentração de ar média no escoamento era da ordem de 5% ou menos.

A análise dos parâmetros estatísticos indicou que o comportamento da distribuição longitudinal das pressões sobre vertedouros em degraus submetidos à aeração induzida é bem representado pela Equação 5.9 (eixo das ordenadas) e pela Equação 5.10 (eixo das abscissas). Assim, foram propostos modelos para previsão da distribuição longitudinal das pressões sobre as faces verticais



e horizontais dos degraus, nessas condições, traduzidos pela Equação 5.11 e pela Equação 5.12, respectivamente. Os coeficientes de ajuste das referidas equações foram apresentados segundo diferentes combinações entre os dados das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , resultando em  $0,65 \leq R^2 \leq 0,95$ , aproximadamente, nas equações de previsão de pressões extremas (positivas e negativas).

Os intervalos de validade dos principais parâmetros hidráulicos associados à elaboração do modelo de previsão, visando aplicação a outros casos, são  $3 \leq Fr_0 \leq 5,2$  e  $0,15 \leq h_c \leq 0,30$ . Além disso, reitera-se que o modelo proposto foi construído em uma calha com degraus de altura  $h_d = 0,06 \text{ m}$  e ângulo de inclinação  $\alpha = 53,13^\circ$ , considerando dispositivo aerador que possui  $\theta = 7,6^\circ$ .

## 7.5 AVALIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE AR NO ESCOAMENTO

Uma vez que o presente trabalho não contemplou a medição em laboratório da concentração de ar no escoamento, foram considerados modelos que permitem a estimativa desse parâmetro. Assim, utilizaram-se equações de Matos (1999), Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), respectivamente, nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ , para estimativa da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$ . Tais modelos foram selecionados em virtude das características geométricas e hidráulicas contempladas pelos respectivos autores serem próximas das aqui consideradas, bem como em razão da semelhança no aspecto visual do escoamento aqui avaliado, em comparação ao dos autores.

Levando em conta os resultados dos modelos mencionados,  $C_b$  na condição  $D_{10}$  resultou superior às condições NAT e  $D_1$ , o que parece coerente se considerado o aspecto visual do escoamento. Contudo, para confirmação dos resultados, futuras medições em laboratório não devem ser descartadas (ver item 7.8). Além disso, com base nos resultados obtidos, na condição  $D_{10}$  o escoamento atinge a zona de características quase uniformes (no que diz respeito à aeração no fundo do escoamento  $C_{bu}$ ) em porções mais a montante do que nas condições  $D_1$  e NAT.

Na condição  $D_1$ , há estreita semelhança entre o degrau onde inicia a aeração superior do escoamento – definida por Novakoski (2021) – e o degrau onde inicia o aumento abrupto em  $C_b$ , com base no modelo de Pfister et al. (2006a). Esse fato corrobora, em parte, a adequabilidade da aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a) nesta condição.

## 7.6 ANÁLISE CONJUNTA ENTRE AS PRESSÕES E A CONCENTRAÇÃO DE AR

A análise conjunta entre as pressões hidrodinâmicas – medidas nos ensaios – e a concentração de ar no escoamento – estimada com base nos modelos de previsão de Matos (1999), Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016) – permitiu avaliar as prováveis zonas submetidas a danos por cavitação. Esta metodologia pode, inclusive, servir como uma alternativa na definição da posição otimizada do sistema aerador ao longo da calha (podendo ser aplicada em conjunto, em substituição ou em complementação às demais metodologias utilizadas para tal, apresentadas no APÊNDICE B).

Nesse caso, em substituição aos dados de pressão medidos, pode-se adotar o modelo de previsão de pressões proposto neste trabalho.

A análise conjunta entre as pressões (nesse caso, considerando as pressões extremas mínimas  $P_{0,1\%}$ ) e a concentração de ar  $C_b$  permitiu concluir que, no caso de um protótipo com  $h_d = 0,90 \text{ m}$ , a adoção de um aerador nas proximidades do degrau nº10 (condição  $D_{10}$ ) permitiria um incremento nas vazões do escoamento (com segurança, sem riscos a danos por cavitação) da ordem de 70% ou mais em comparação com uma estrutura submetida à aeração natural (condição NAT), ou com aerador instalado no primeiro degrau (condição  $D_1$ ). Em alguns casos, a condição  $D_{10}$  sugere a possibilidade de passagem de vazões superiores a  $40 \text{ m}^2/\text{s}$  sem apresentar regiões em risco, ao passo que nas condições NAT e  $D_1$  a vazão sem risco se limitaria à ordem de  $15 \text{ m}^2/\text{s}$ .

Com isso conclui-se que, para garantir a melhor eficiência do sistema aerador, é imprescindível o estudo prévio do local ideal, ao longo da calha, onde este será instalado. Isso porque, como sugerem os resultados apresentados, as vazões máximas que não estão associadas a danos resultaram, na condição  $D_1$ , muito semelhantes às da condição NAT. Ou seja, de acordo com os critérios adotados, a instalação de um aerador nas proximidades da ogiva do vertedouro (condição  $D_1$ ) não resultaria em ganho significativo, quando comparada à condição sem aerador (NAT), no que diz respeito ao possível incremento de vazões específicas máximas de água sobre a estrutura.

Porém, embora os resultados obtidos neste trabalho sugiram que a condição  $D_1$ , quando comparada à condição NAT, não tenha resultado em ganho significativo em termos de vazão específica máxima, isso não significa que, necessariamente, para todas as situações reais, um sistema aerador posicionado nas proximidades da ogiva do vertedouro não será eficiente. Para vertedouros em degraus com altura reduzida, por exemplo, talvez a única alternativa possível seja a de instalar-se um sistema aerador nas proximidades da ogiva (caso seja necessário e viável). Desse modo, essa alternativa não deve ser descartada, mas sim, avaliada de maneira a selecionar a geometria do sistema aerador mais eficiente nessa situação.

## 7.7 EXEMPLO DE APLICAÇÃO PRÁTICA

O Capítulo 6 apresentou, por meio de um exemplo prático, um método que permite ao usuário identificar a necessidade ou não da colocação de um sistema aerador em um vertedouro em degraus, bem como avaliar os parâmetros do escoamento a ele associados (isto é, o comprimento do jato, o coeficiente de entrada de ar, as pressões hidrodinâmicas sobre a estrutura e a concentração de ar no fundo do escoamento). Para isso, foram utilizados tanto métodos e modelos já explorados e recomendados por outros autores, como também os propostos ao longo deste trabalho.

Ao final do Capítulo 6 apresenta-se um fluxograma do passo a passo de cálculo proposto, de forma esquemática, visando aplicação prática do método no meio técnico.

## 7.8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho foram propostas equações para previsão do comprimento do jato (Equação 5.4, Equação 5.5 e Equação 5.6), para estimativa do coeficiente de entrada de ar (Equação 5.7) e para previsão da distribuição das pressões ao longo da calha (Equação 5.9 até Equação 5.12), considerando aeração induzida no escoamento, conforme dados coletados com sistema aerador posicionado em duas regiões distintas (e de forma independente) ao longo da calha. Uma vez que as referidas equações consideram parâmetros do escoamento associados ao local de instalação do sistema aerador, acredita-se que a aplicação destas seja adequada para situações onde o sistema aerador esteja posicionado em qualquer ponto ao longo da calha (ou seja, não apenas nos degraus nº1 ou nº10). Contudo, para validação desta hipótese, é necessário aplicar as referidas equações nessas situações, comparando os resultados obtidos com dados medidos experimentalmente. Sendo assim, esta é uma recomendação para avaliação futura.

Parte das conclusões deste trabalho foi obtida com base na aplicação de modelos de previsão da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  (e, portanto, não está associada a dados de concentração de ar medidos experimentalmente). Então, de modo a verificar os resultados de  $C_b$  estimados neste trabalho, bem como validar (ou não) as conclusões a eles associadas, é imprescindível considerar-se, em trabalhos futuros, a medição da concentração de ar no escoamento, nas mesmas condições que as aqui avaliadas.

Os resultados obtidos no presente trabalho sugerem que a condição  $D_1$  não parece eficiente, quando comparada à condição NAT, no que diz respeito ao possível incremento de vazão específica sobre a estrutura. Porém, talvez seria caso a altura do defletor ( $t$ ) fosse maior. Inclusive, Terrier (2016) recomenda que, para a maior eficiência do sistema aerador, deve-se considerar a relação  $t/h_0 \geq 0,16$  (e no presente trabalho tem-se, na condição  $D_1$ ,  $0,07 \leq t/h_0 < 0,16$ ). Sendo assim sugere-se que, em trabalhos futuros, ainda sejam contemplados casos com o sistema aerador posicionado imediatamente a jusante da ogiva, porém, considerando maiores alturas de defletor  $t$ . Contudo, deve-se considerar a relação existente entre o aumento de  $t$  e a possível redução do comprimento da calha em degraus em contato com o escoamento, uma vez que isso pode impactar na dissipação de energia do escoamento ao longo da queda.

Para atendimento aos objetivos deste trabalho, concentrou-se na avaliação do escoamento sobre a calha em degraus, sem levar em conta os aspectos relacionados à dissipação de energia do escoamento – seja ao longo da queda ou na estrutura de dissipação a jusante. Trabalhos como os de Zamora et al. (2008), Novakoski (2021) e Tassinari (2022) concluíram que um aerador posicionado nas proximidades da ogiva do vertedouro não altera o coeficiente de perda de carga entre o escoamento e a calha em degraus e, desse modo, não há perda significativa na dissipação de energia total do escoamento na condição de aeração induzida, quando comparada à condição de aeração natural, no final da calha. Contudo, uma vez que aeradores posicionados mais a jusante

na calha contribuem com maiores quantidades de ar inseridas no escoamento, é possível que, nesses casos, ocorra variação importante na dissipação de energia ao longo da queda (em comparação com a condição de aeração natural). Sendo assim, em trabalhos futuros, recomenda-se a avaliação da dissipação de energia do escoamento sobre calhas em degraus contemplando a instalação de aeradores em posições mais distantes da ogiva do vertedouro.

Para avaliação das prováveis zonas submetidas a danos oriundos do fenômeno da cavitação, considerou-se a análise conjunta entre a distribuição longitudinal das pressões sobre os degraus e a concentração de ar no escoamento. Porém, esse método não é capaz de avaliar a intensidade dos danos – uma vez que estes são também função das características do concreto empregado na estrutura (GAL'PERIN et al., 1971) e do tempo de exposição ao fenômeno (GAL'PERIN et al., 1971; FALVEY, 1982), características estas que não foram levadas em conta aqui. Sendo assim, como recomendação futura, sugere-se a consideração de uma abordagem que seja capaz de avaliar conjuntamente as características do escoamento (como as pressões e a concentração de ar), a resistência estrutural do concreto e o tempo de exposição ao fenômeno da cavitação, com o objetivo de avaliar a intensidade dos danos e a proteção pela aeração.

Um dos principais objetivos da instalação de sistemas aeradores em vertedouros é a possibilidade de incremento nas vazões específicas escoadas sobre a estrutura, em razão da aeração proporcionada ao escoamento. Por sua vez, a possibilidade de passagem de vazões específicas mais elevadas pelo vertedouro, embora esteja associada à redução dos custos de construção dessa estrutura (que será mais estreita), poderá estar relacionada também com o respectivo incremento na geometria da estrutura de dissipação de energia a jusante do vertedouro. Nesse sentido, fica o questionamento do que seria mais vantajoso, do ponto de vista técnico-econômico, entre i) adotar vertedouros mais estreitos em conjunto com aeradores e, possivelmente, estruturas de dissipação de energia mais robustas ou ii) adotar um vertedouro mais largo, sem aerador. No momento, ainda não é possível dizer o que é mais vantajoso. Assim, coloca-se também esta questão como possível tema para investigações futuras.

## 8 REFERÊNCIAS

AMADOR, A. **Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado**. Tese (Doutorado). Universidade Politécnica da Catalunha (UPC), Barcelona, 2005.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 12, p.1092-1100, dez. 2009.

\_\_\_\_\_. Discussion of “Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways” by Robert M. Boes and Willi H. Hager. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, n. 5, p.421-423, maio 2005.

ARANTES, E. J. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. 178 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia (Hidráulica e Saneamento), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BAI, R.; ZHANG, F.; LIU, S.; WANG, W. Air concentration and bubble characteristics downstream of a chute aerator. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 87, p.156-166, set. 2016.

BOES, R.; HAGER, W. H. Hydraulic Design of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 9, p.671-679, set. 2003a.

BOES, R.; HAGER, W. H. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 129, n. 9, p.661-670, set. 2003b.

BOLLAERT, E.; SCHLEISS, A. Scour of rock due to the impact of plunging high velocity jets Part I: a state-of-the-art review. **Journal of Hydraulic Research**, v. 41, n. 5, p.451-464, set. 2003.

BRENNEN, C. E. **Cavitation and Bubble Dynamics**. Nova York: Oxford University Press, 1995.

BRUSCHIN, J. Air entrainment: Aeration off-sets for spillway chutes and bottom outlets. In: KOBUS, H.. **Symposium on Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures**. Esslingen Am Neckar: Sprint Druck, 1984. p. 4.3-1 – 4.3-4.

CANELLAS, A. V. B. **Pressões extremas atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros**. Tese (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

CE CONSTRUCTION SOLUTIONS. Cotter Dam. 2015. Disponível em <https://teamce.com.au/projects/cotter-dam/>. Acesso em: 22 set. 2022.

CHANSON, H. Discussion of “Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways” by K. Warren Frizell, Floriana M. Renna, and Jorge Matos. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 141, n. 5, maio 2015.

\_\_\_\_\_. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 3, p.445-460, 1994.

\_\_\_\_\_. Stepped spillway flows and air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 20, p.422-435, 1993.

\_\_\_\_\_. Study of air entrainment and aeration devices. **Journal of Hydraulic Research**, v. 27, n. 3, p.301-319, maio 1989.

\_\_\_\_\_. Study of air entrainment and aeration devices on spillway model. Tese (Doutorado). Universidade de Canterbury, Christchurch, 1988.

\_\_\_\_\_. Turbulent air–water flows in hydraulic structures: dynamic similarity and scale effects. **Environmental Fluid Mechanics**, n. 9, p.125-142, set 2009.

DAI PRÁ, M. **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:1H**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

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

DONG, Z.; LIU, Z.; WU, Y.; ZHANG, D. An experimental investigation of pressure and cavitation characteristics of high velocity flow over a cylindrical protrusion in the presence and absence of aeration. **Journal of Hydrodynamics**, v. 20, n. 1, p.60-66, jul. 2008.

DONG, Z.; SU, P. Cavitation control by aeration and its compressible characteristics. **Journal of Hydrodynamics**, v. 18, n. 4, p.499-504, fev. 2006.

DONG, Z.; WU, Y.; ZHANG, D. Cavitation characteristics of offset-into-flow and effect of aeration. **Journal of Hydraulic Research**, v. 48, n. 1, p.74-80, fev. 2010.

ENDRES, L. A. M.; SCHUMACHER, A.; CANELLAS, A. V. B.; SILVA, F. A. Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus. In: XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens. **Anais...** . Salvador: 2019.

Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EEUFMG). **Curso sobre semelhança e modelação física em hidráulica**. Departamento de Engenharia Hidráulica da EEUFMG. Belo Horizonte: 1989.

FALVEY, H T. **Cavitation in Chutes and Spillways**. Engineering Monograph No. 42 USBR. Denver: RNW, 1990. 145 p.

FALVEY, H T. Predicting cavitation in tunnel spillways. **International Water Power and Dam Construction**, 1982.

FERLA, R.; NOVAKOSKI, C. K.; TEIXEIRA, E. D.; DAI PRA, M.; MARQUES, M. G.; CANELLAS, A. V. B. Calhas em degraus com aeração induzida: avaliação da entrada de ar no sistema aerador e das pressões sobre os degraus. **I Simpósio Nacional de Mecânica dos Fluidos e Hidráulica**. Ouro Preto: 2022.

FERLA, R.; NOVAKOSKI, C. K.; PRIEBE, P. S.; DAI PRÁ, M.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D. Stepped spillways with aerators: hydrodynamic pressures and air entrainment. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 26, e4, 2021.

FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, n. 6, p.630-636, jun. 2013.

\_\_\_\_\_. Closure to "Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways" by K. Warren Frizell, Floriana M. Renna, and Jorge Matos. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 141, n. 8, 2015.

GAL'PERIN, R. S.; KUZ'MIN, K. K.; NOVIKOVA, I. S.; OSKOLKOV, A. G.; SEMENKOV, V. M.; TSEDROV, G. N. Cavitation in elements of hydraulic structures and methods of controlling it. Traduzido de **Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo**, p.726-732, ago. 1971.

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

HELLER, V. Scale effects in physical hydraulic engineering models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n. 3, p.293-306, jun. 2011.

HOUSTON, K L. **Hydraulic model studies of upper stillwater dam stepped spillway and outlet works**. Relatório REC-ERG874 USBR. Denver: RC/SA, 1987. 51 p.

KELLS, J A.; SMITH, C. D. Reduction of cavitation on spillways by induced air entrainment. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 18, p.358-377, 1991.

KOEN, J., BOSMAN, D. E.; BASSON, G. R.. **Large unit discharge stepped spillway designs with crest piers and flares**. [s.l.] Nov. 2017.

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

LOPARDO, R. A. Contribution of hydraulic models on the safe design of large dams stilling basins. In: IAHR Symposium on Hydraulic and Hydrological Aspects of Reliability and Safety Assessment of Hydraulic Structures. **Anais...** . São Petersburgo: 2002.

MARQUES, M. G.; FERLA, R.; NOVAKOSKI, C. K.; DAI PRÁ, M.; TEIXEIRA, E. D.; ENDRES, L. A. M.; PRESTES, A. C.; MORAES, P. J.; RIGO, A. F.; CANELLAS, A. V. B.; MATOS, J. Stepped spillway flow: pre-aeration with deflector. In: 38<sup>th</sup> IAHR World Congress. **Anais...** . Panama: 2019.

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

\_\_\_\_\_. Hydraulic design of stepped spillways over RCC dams. In: International Workshop on Hydraulics of Stepped Spillways. **Proceedings...** . Ed. Minor, H.E.; Hager, W.H.; Balkema: Rotterdam; p.187–194, Zurique: 2000.

\_\_\_\_\_. **O arejamento como medida de protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 1990.

MATOS, J.; NOVAKOSKI, C. K.; FERLA, R.; MARQUES, M. G.; DAI PRÁ, M.; CANELLAS, A. V. B.; TEIXEIRA, E. D. Extreme Pressures and Risk of Cavitation in Steeply Sloping Stepped Spillways of Large Dams. **Water**, [s.l.], v. 14, n. 3, p.306, jan. 2022.

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

MEIRELES, I.; MATOS, J.; MELO, J.F. **Modelação teórico-experimental do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus sobre barragens de betão**. In Seminário: Barragens – Tecnologia, Segurança e Interação com a Sociedade; Comissão Nacional Portuguesa das Grandes Barragens (CNPGB): Lisboa, 2005.

MEIRELES, I.; RENNA, F.; MATOS, J.; BOMBARDELLI, F. Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, n. 10, p.870-877, out. 2012.

MOJTABA, S.; HABIB, M. F.; MAHMOOD, S. B.; ALIREZA, M.; ALI, K. H. Experimental study of effect of installing deflector on replacement of inception point of air entrainment in stepped spillways. **Journal of Scientific Research and Development** 2, v. 4, p.11-16, 2015.

NOVAKOSKI, C. K.; PRIEBE, P. S.; CANELLAS, A. V. B.; SARAIVA, L. S.; DAI PRÁ, M.; SANAGIOTTO, D. G.; OSMAR, F. M.; PINTO, L. C. S.; MARQUES, M. G.; MATOS, J. Extreme



negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways. In: Third International Dam World Conference. **Anais...** . Foz do Iguaçu: 2018.

NOVAKOSKI, C. K. **Análise da macroturbulência do escoamento sobre vertedouro em degraus com aeração induzida por defletor e câmara de ar**. Tese (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2021.

NOVAKOSKI, C. K.; FERLA, R.; DAI PRÁ, M.; CANELLAS, A. V. B.; MARQUES, M. G.; TEIXEIRA, E. D. Stepped spillway with pre-aeration by a deflector: flow characteristics. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e26, 2020.

PARSONS, C. A. Self-Aeration and Friction over Rock Chutes in Uniform Flow Conditions. **Nature**, v. 61, n. 1583, p.424-428, março 1900.

PETERKA, Alvin J. **The effect of entrained air on cavitation pitting**. International Association for Hydraulic Research and Hydraulics Division. Minneapolis: 1953.

PFISTER, M. Chute Aerators: steep deflectors and cavity subpressure. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s.l.], v. 137, n. 10, p.1208-1215, out. 2011.

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

PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. **Journal of Hydrodynamics**, v. 26, n. 2, 2014.

PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute Aerators. I: Air Transport Characteristics. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 136, n. 6, p.352-359, jun. 2010a.

\_\_\_\_\_. Chute Aerators. II: Hydraulic Design. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 136, n. 6, p.360-367, jun. 2010b.

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

PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. Bottom Aeration of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 8, p.850-853, ago. 2006a.

\_\_\_\_\_. Stepped chutes: Pre-aeration and spray reduction. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 32, n. 2, p.269-284, fev. 2006b.

PINTO, N. L.; NEIDERT, S. H.; OTA, J. J. Aeration at high velocity flows I/II. **Water Power & Dam Construction**, p.34–38 (I), p.42–44 (II), 1982.

PRIEBE, P. S. **Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus**. Tese (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

PRISK, M.; RICHARDS, M.; HIEATT, M. Delivering Wadi Dayqah, Oman's tallest dam. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, [s.l.], v. 162, n. 6, p.42-50, dez. 2009.

QUINTELA, A. C.; RAMOS, C. M. Protecção contra a erosão de cavitação em obras hidráulicas. **Memória Nº 539 do Laboratório Nacional de Engenharia Civil**. Lisboa: 1980.

RASMUSSEN, R. E. H. Some experiments on cavitation erosion in water mixed with air. In: Symposium held at the National Physical Laboratory. **Anais...** . Londres: National Physical Laboratory, 1956. p. 20.1 – 20.25.

RIOTACT. **Taking a look at the enlarged Cotter Dam**. 2013. Disponível em: <https://the-riotact.com/taking-a-look-at-the-enlarged-cotter-dam/117143>. Acesso em: 22 set. 2022.

RUSSEL, S. O.; SHEEHAN, G. J. Effect of entrained air on cavitation damage. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 1, p.97-107, 1974.

RUTSCHMANN, P.; VOLKART, P.; WOOD, I. R. Air entrainment at spillway aerators. In: 9<sup>th</sup> Australasian Fluid Mechanics Conference. **Anais...** . Auckland: 1986.

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

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

\_\_\_\_\_. Analysis of pressures on a stepped spillway. **Journal of Hydraulic Research**, v. 46, n. 3, p.410-414, maio 2008.

SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Experimental study of transition and skimming flows on stepped spillways in RCC dams: qualitative analysis and pressure measurements. **Journal of Hydraulic Research**, v. 43, n. 5, p.540-548, set. 2005.

SÁNCHEZ-JUNY, M. **Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado: Análisis del campo de presiones**. Tese (Doutorado) - Programa de Doctorado En Ingenieria Civil, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2001.

SCHUMACHER, A. **Identificação de regiões propícias a danos por cavitação na calha de um vertedouro em degraus: aspectos hidráulicos e geométricos**. Dissertação (Mestrado).

Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2020.

SELL, B. M. **Efeito de Escala em Modelos Físicos Reduzidos de Vertedouros em Degraus**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, UFPel, Pelotas, 2020.

SEMENKOV, V. M.; LENTYAEV, L. D. Spillway with nappe aeration. **Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo**, p.436-441, maio 1973.

TAKAHASHI, M.; OHTSU, I. Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes. **Journal of Hydraulic Research**, [s.l.], v. 50, n. 4, p. 427-434, 2012.

TAKAHASHI, M.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. Effect of Reynolds number on characteristics of skimming flows in stepped channels. In **Proceedings of the 31<sup>st</sup> IAHR Congress**, Seul, p 2880–2889, set. 2005.

TASSINARI, L. C. S. **Escoamento sobre vertedouros em degraus de alta declividade: análise de incertezas com uma abordagem computacional**. Tese (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2022.

TASSINARI, L. C. S.; SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G.; LAUFFER, L. L.; TRIERWEILER NETO, E. F. Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 25, e3, 2020.

TERRIER, S.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A.J. Comparison of chute aerator effect on stepped and smooth spillways. In: 36th IAHR World Congress. **Anais...** . Haia: 2015.

TERRIER, S. **Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features**. Communication 63, Laboratoire de Constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2016.

TERRIER, S.; PFISTER, M.; SCHLEISS, A. J. Performance and Design of a Stepped Spillway Aerator. **Water**, [s.l.], v. 14, n. 2, p.153, jan. 2022.

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

TOZZI, M. J.; TANIGUCHI, E.; OTA, J. Air concentration in flows over stepped spillways. In: 1998 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. **Anais...** . Washington: 1998.

TULLIS, J. P. **Cavitation in Hydraulic Systems**. São Paulo: USP Escola Politécnica, 1982.

- VOLKART, P. **Air Slots for Flow Aeration**: Determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway. Zurique: 1983.
- VOLKART, P; RUTSCHMANN, P. **Air Entrainment Devices (Air Slots)**. Zurique: 1984.
- WANG, S.; HOU, D.; WANG, C. Aerator of stepped chute in Murum Hydropower Station. **Procedia Engineering**, v. 28, p.803-807, 2012.
- WHITE, F. M. **Mecânica dos fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 880 p.
- WILLEY, J.; LESLEIGHTER, E.; EWING, T.; DYMKE, J. **Refinement of the Hydraulic Design of a Complex Stepped Spillway through Numerical and Physical Modelling**. 2010.
- WOOD, I. R. Free surface air entrainment on spillways. In: **Air entrainment in free-surface flows**. Ed. Wood, I. R. Balkema: Rotterdam; p. 55 – 84, 1991.
- ZAGUSTIN, K.; MANTELLINI, T.; CASTILLEJO, N. Some experience on the relationship between a model and prototype for flow aeration in spillways. In: International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures. **Anais...** . Coventry: 1982.
- ZAMORA, A. S.; PFISTER, M.; HAGER, W.; MINOR, H-E. Hydraulic Performance of Step Aerator. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 134, n. 2, p.127-134, fev. 2008.
- \_\_\_\_\_. Closure to “Hydraulic Performance of Step Aerator” by Anina Schiess Zamora, Michael Pfister, Willi H. Hager, and Hans-Erwin Minor. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 135, n. 7, p.621-622, jul. 2009.

## 9 APÊNDICE A

### TESTES DE AERAÇÃO INDUZIDA COM SOPRADOR

A partir de pesquisa à bibliografia que trata da avaliação das pressões hidrodinâmicas nas condições de aeração natural e aeração induzida sobre vertedouros em degraus – em especial, Priebe (2020) e Novakoski (2021) –, foram identificadas diferenças importantes nas conclusões gerais dos autores, principalmente no que diz respeito à suposta amenização das pressões com o aumento da concentração de ar no escoamento. Enquanto as conclusões de Priebe (2020) indicam o “amortecimento” de  $P_{0,1\%}$  na condição de aeração induzida (em comparação com a aeração natural), até mesmo em porções a jusante da zona influenciada pelo impacto do jato nos degraus, Novakoski (2021) não identificou variações significativas nas pressões medidas em ambas as condições (com exceção da região influenciada pelo impacto do jato).

Assim, previamente à definição dos objetivos e da metodologia desta pesquisa, realizaram-se testes com aeração induzida por um soprador, equipamento mecânico capaz de inserir quantidades pré-estabelecidas de ar no interior do escoamento. Este apêndice trata sobre a metodologia e os resultados obtidos nos referidos testes, cujo objetivo principal foi:

- i) Verificar a relação existente entre a aeração induzida e a distribuição longitudinal das pressões sobre os degraus, ao longo da calha do vertedouro, considerando diferentes coeficientes de entrada de ar ( $\beta$ ) no sistema aerador.

#### 9.1 METODOLOGIA

Utilizaram-se três condições distintas de ensaio, ilustradas na Figura 9.1, sendo elas:

- i) Aeração natural (NAT): configuração sem elementos aeradores na calha;
- ii) Aeração induzida sem soprador (SS): configuração com a presença de defletor e câmara de ar. Ambos estão instalados no primeiro degrau da calha. Esta configuração é idêntica à configuração  $D_1$  (apresentada no Capítulo 4), entretanto será aqui nomeada como “SS” para diferenciá-la da configuração com soprador (a condição seguinte). Na configuração SS, a entrada de ar na câmara ocorre pela ação natural do escoamento sobre o vertedouro, que proporciona a sucção do ar pelo duto do sistema aerador;
- iii) Aeração induzida com soprador (CS): configuração semelhante à anterior (SS), porém, a entrada de ar na câmara se dá de forma mecânica, com auxílio de um soprador (*Einhell BT-VC 1450S*), cujo controle de rotação é feito por meio de inversor de frequência (*Weg CFW-08*). O intuito desta configuração é avaliar os valores de pressão em situações com coeficientes  $\beta$  superiores aos da condição SS, e não tem a pretensão de viabilizar a instalação de um sistema mecânico de injeção de ar em protótipo.

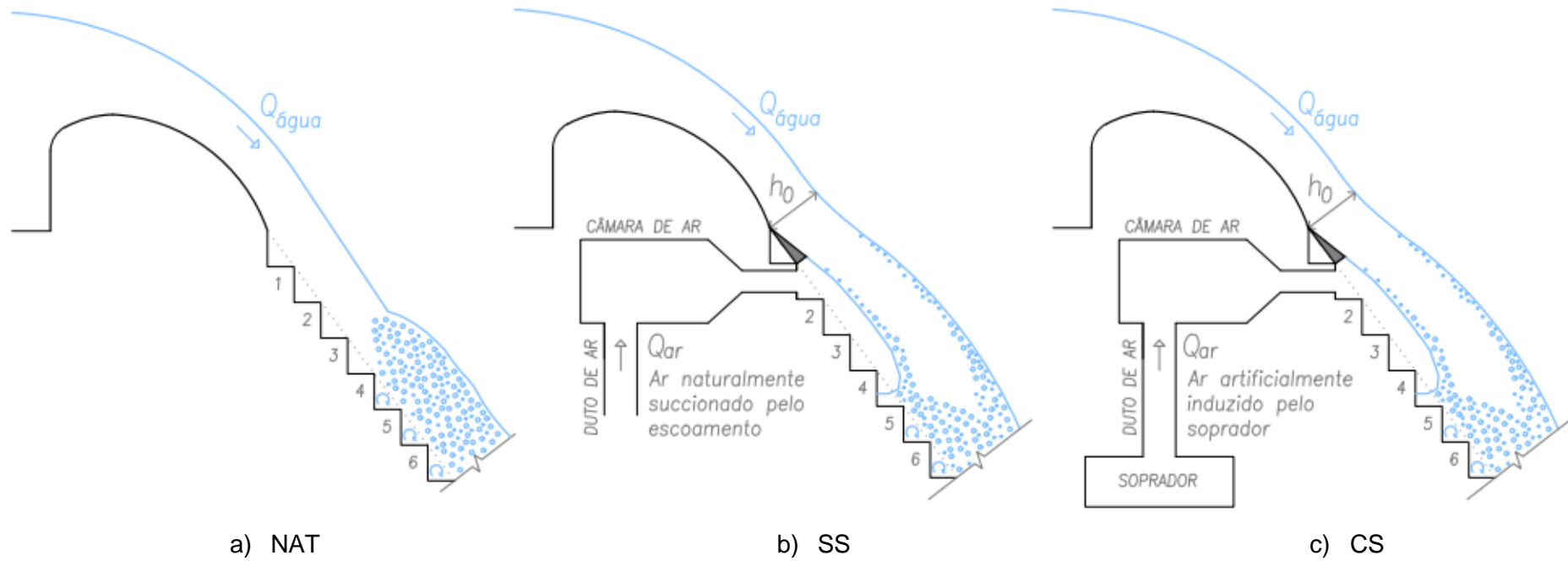


Figura 9.1 – Representação esquemática, em vista lateral, das configurações de ensaio a) NAT (aeração natural), b) SS (aeração induzida sem soprador, idêntica à condição “D<sub>1</sub>” definida no Capítulo 4) e c) CS (aeração induzida com soprador, para coeficientes  $\beta$  pré-estabelecidos e iguais a 2%, 6%, 8% e 10%, a depender da vazão escoada, ver Tabela 9.1).

Os valores obtidos nas configurações NAT e SS são provenientes de parte das contribuições de Canellas (2020), Novakoski (2021) e Matos et al. (2022) e foram inseridos na análise de modo a servirem como referência às comparações.

Realizaram-se ensaios de medição de pressão hidrodinâmica sobre os degraus e de entrada de ar pelo sistema aerador (para extrair o coeficiente de entrada de ar  $\beta$ ), no intervalo  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (em modelo físico). O resumo das condições ensaiadas consta na Tabela 9.1.

Tabela 9.1 – Configurações de ensaio – APÊNDICE A.

CONDIÇÃO DE AERAÇÃO	$q \text{ (m}^2/\text{s)}$	$\beta \text{ (%)}$
Natural (NAT)	0,20	-
	0,30	-
	0,40	-
	0,50	-
Induzida sem soprador (SS)	0,20	3,6
	0,30	2,4
	0,40	1,4
	0,50	1,3
Induzida com soprador (CS)	0,20	6
		8
		10
	0,30	6
		8
		10
	0,40	2
		6
		8
		10
	0,50	2
		6
8		
10		

Na configuração CS, testaram-se valores pré-estabelecidos de  $\beta$  iguais a 2%, 6%, 8% e 10%, em conformidade com a faixa de coeficientes médios indicados por Peterka (1953). Na Tabela 9.1 também consta o coeficiente  $\beta$  medido na condição SS. O conhecimento de tais resultados orientou a tomada de decisão dos coeficientes  $\beta$  a serem explorados na condição CS: optou-se por analisar apenas os valores superiores aos medidos na configuração SS. Por exemplo, para  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ , uma vez que o coeficiente  $\beta$  medido na condição SS resultou igual a 3,6%, optou-se por não analisar a condição de  $\beta = 2\%$  na configuração CS nesta vazão (ver Tabela 9.1).

O tempo e a frequência de aquisição de dados, bem como os equipamentos utilizados para tal, são os mesmos já indicados no Capítulo 4 (item 4.3).

A Tabela 9.2 e a Tabela 9.3 apresentam as principais características dos transdutores de pressão utilizados, respectivamente, nas faces horizontal (H) e vertical (V) dos degraus. A faixa de medição dos transdutores está indicada em unidades de altura piezométrica (m), e a exatidão com relação ao fundo de escala dos instrumentos (FE).

Tabela 9.2 – Características dos transdutores de pressão conectados na face horizontal dos degraus.

Face horizontal (H+Nº degrau)	Aeração natural (NAT)			Aeração induzida (SS e CS)		
	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (%FE)	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (%FE)
H2	-	-	-	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
H3	-	-	-	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
H4	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
H5	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	H - TM25	- 0,5 a 1,5	0,25%
H6	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H7	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H8	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H9	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-
H10	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H11	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H12	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H13	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H14	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H15	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H16	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H17	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H18	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-
H19	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-
H20	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H21	-	-	-	-	-	-
H22	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	-	-	-
H23	H - TM25	- 0,5 a 1,5	0,25%	-	-	-
H25	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H26	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H29	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H32	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H35	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H36	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H40	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H42	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H46	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H51	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%

\*Sendo: O – Omega, S – Sitron e H – Hytronic.



Tabela 9.3 – Características dos transdutores de pressão conectados na face vertical dos degraus.

Face vertical (V+Nº degrau)	Aeração natural (NAT)			Aeração induzida (SS e CS)		
	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)
V2	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
V3	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
V4	-	-	-	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
V5	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V6	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V7	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V8	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V9	-	-	-	-	-	-
V10	-	-	-	-	-	-
V11	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V12	-	-	-	-	-	-
V13	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V14	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V15	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V16	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V17	-	-	-	-	-	-
V18	-	-	-	-	-	-
V19	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-
V20	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
V21	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V22	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-
V23	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-
V25	-	-	-	-	-	-
V26	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V29	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V32	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V35	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-
V36	-	-	-	-	-	-
V40	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V42	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V46	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V51	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%

\*Sendo: O – Omega, S – Sitron e H – Hytronic.

Os ensaios de aeração induzida sem e com soprador (SS e CS) foram realizados sequencialmente e, desse modo, a configuração de transdutores utilizada é a mesma para ambas as situações, ao passo que os ensaios da configuração de aeração natural (NAT) ocorreram em momento distinto. Assim, entre outros motivos, devido à disponibilidade dos transdutores no laboratório, alguns degraus não possuem instrumentos com as mesmas características para as três configurações aqui descritas. Contudo, entende-se que a distinção entre parte dos instrumentos utilizados nas três configurações não prejudica a comparação entre os resultados. Os dados adquiridos nos ensaios não excederam a faixa de medição dos instrumentos em nenhuma condição.

## 9.2 RESULTADOS

Da Figura 9.2 até a Figura 9.5 estão representados, respectivamente, os parâmetros estatísticos correspondentes à pressão média ( $P_{med}$ ), desvio padrão ( $P_{\theta}$ ) e percentis extremos inferior ( $P_{0,1\%}$ ) e superior ( $P_{99,9\%}$ ), nas faces vertical e horizontal dos degraus, para as configurações NAT, SS e CS.

De modo geral, todos os parâmetros estatísticos analisados são semelhantes nas configurações SS e CS. As principais diferenças entre a condição NAT e as condições SS e CS acontecem nas regiões influenciadas pelo impacto do jato do escoamento nos degraus, representadas por picos especialmente nos parâmetros  $P_{med}$ ,  $P_{\theta}$  e  $P_{99,9\%}$  na face horizontal. Esse comportamento é coerente com o que foi concluído por Novakoski (2021). Nos degraus posicionados a montante do impacto do jato, os parâmetros estatísticos das configurações SS e CS são próximos de zero, como esperado, dado que não há escoamento de água em contato com os degraus nessa região. A jusante, em direção ao trecho final da calha, os resultados das condições NAT, SS e CS tendem a valores semelhantes.

Deve-se destacar, porém, que o parâmetro estatístico  $P_{0,1\%}$  (Figura 9.4), considerando principalmente os resultados de  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ , na face vertical dos degraus, apresentou resultados distintos nas três condições ensaiadas (NAT, SS e CS), especialmente na região influenciada pelo impacto do jato e a jusante dele – isto é, nas proximidades da região chamada de *blackwater*, segundo definições de Pfister et al. (2006a), conforme Figura 3.19. Nessa região, quanto maior  $\beta$ , maior é também  $P_{0,1\%}$  (isto é, menos negativo é  $P_{0,1\%}$ ). Por sua vez, tal comportamento é coerente com o que foi concluído por Priebe (2020), sendo este um detalhe importante quando se está avaliando a suscetibilidade à ocorrência de cavitação nos degraus.

Assim, em resumo, pode-se destacar que:

- i. as principais diferenças entre os resultados das configurações NAT, SS e CS ocorrem nas regiões de impacto do jato sobre os degraus e, aproximadamente, na região de *blackwater* (após o impacto do jato);
- ii. nas porções mais a jusante na calha, os resultados para todas as configurações analisadas tendem a valores semelhantes;
- iii. de modo geral, quanto maior o coeficiente  $\beta$ , mais a jusante ocorre o ponto de impacto do jato na calha. Esse comportamento é visível quando se analisa  $P_{med}$  na face horizontal dos degraus, principalmente;
- iv. na maior parte dos casos, na região de *blackwater* (aproximadamente), quanto maior o coeficiente  $\beta$ , maior o valor de  $P_{0,1\%}$  na face vertical. Ou seja, pode-se considerar que ocorreu a amenização de  $P_{0,1\%}$  na face vertical dos degraus, com o aumento de  $\beta$ . Contudo, esse comportamento não é regra para a face horizontal.

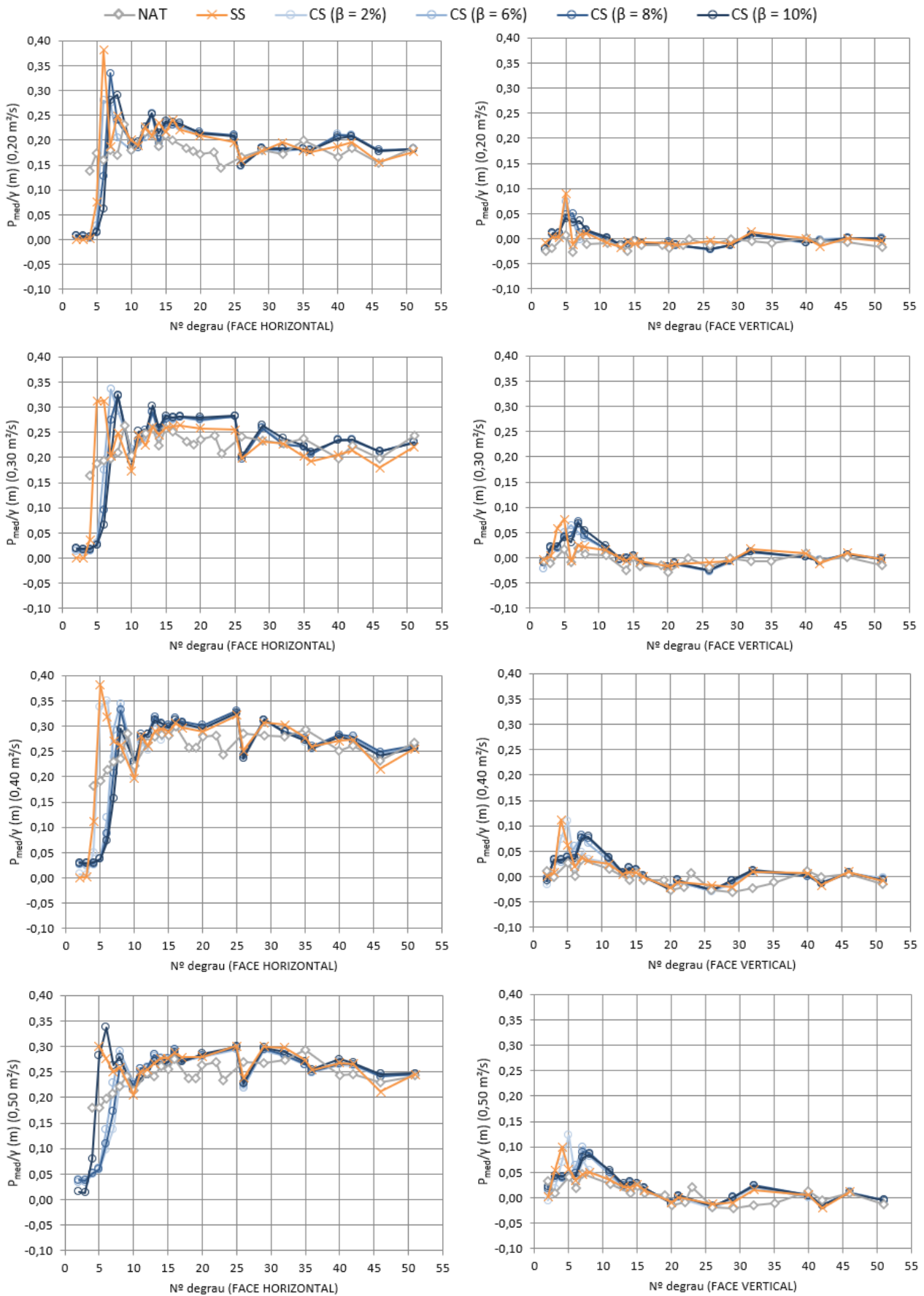


Figura 9.2 – Parâmetro  $P_{med}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

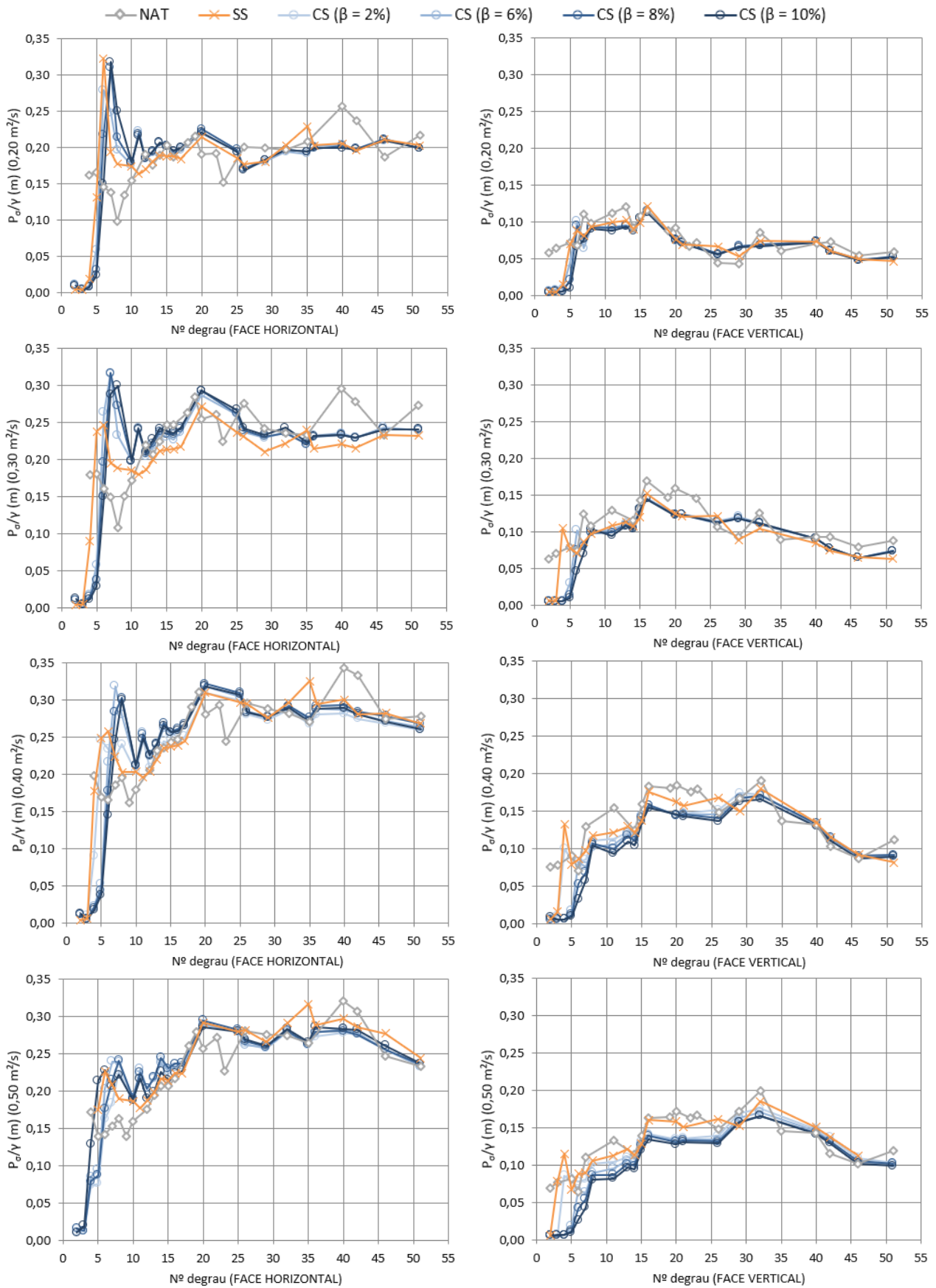


Figura 9.3 – Parâmetro  $P_{\sigma}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

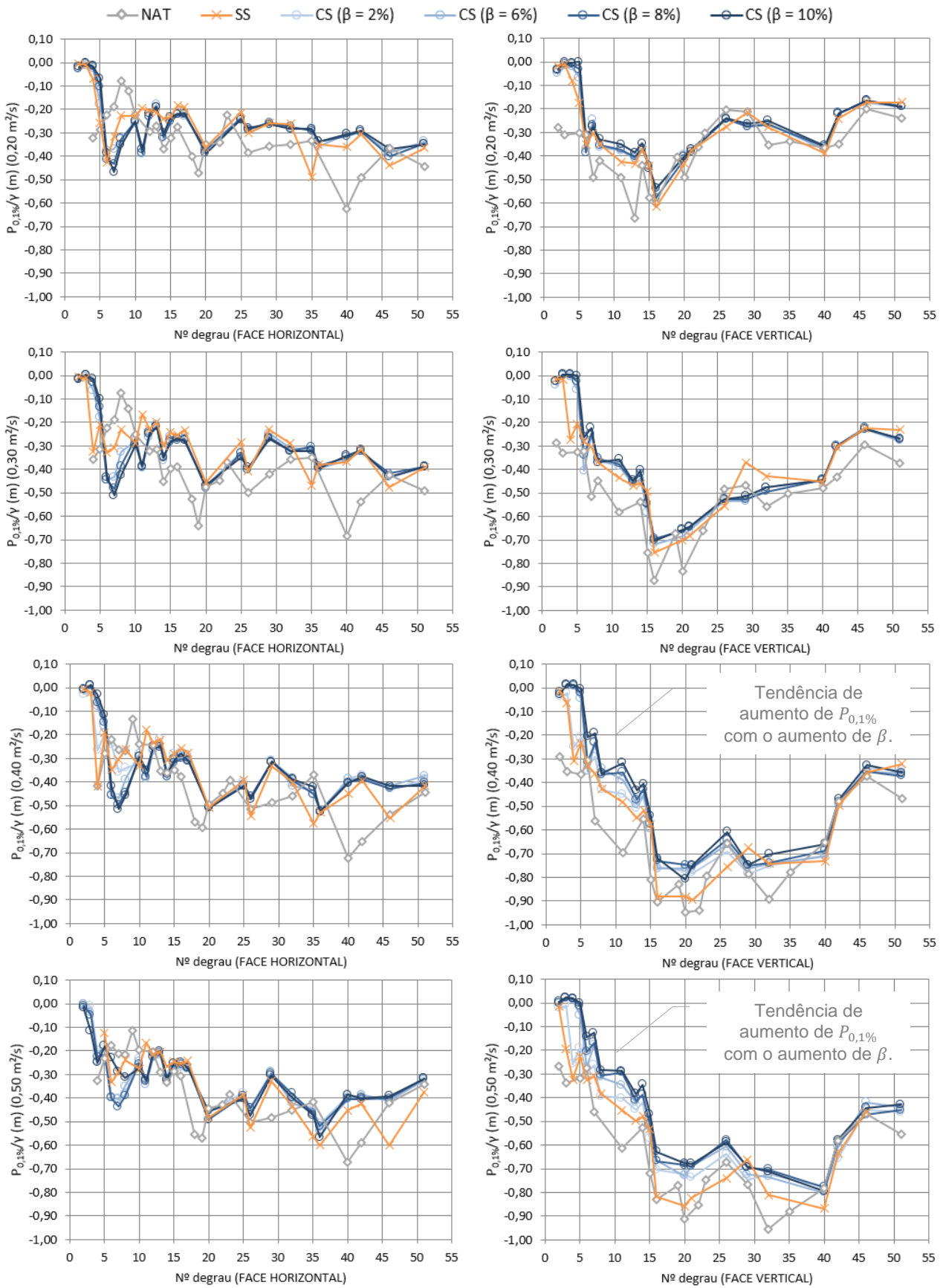


Figura 9.4 – Parâmetro  $P_{0,1\%}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

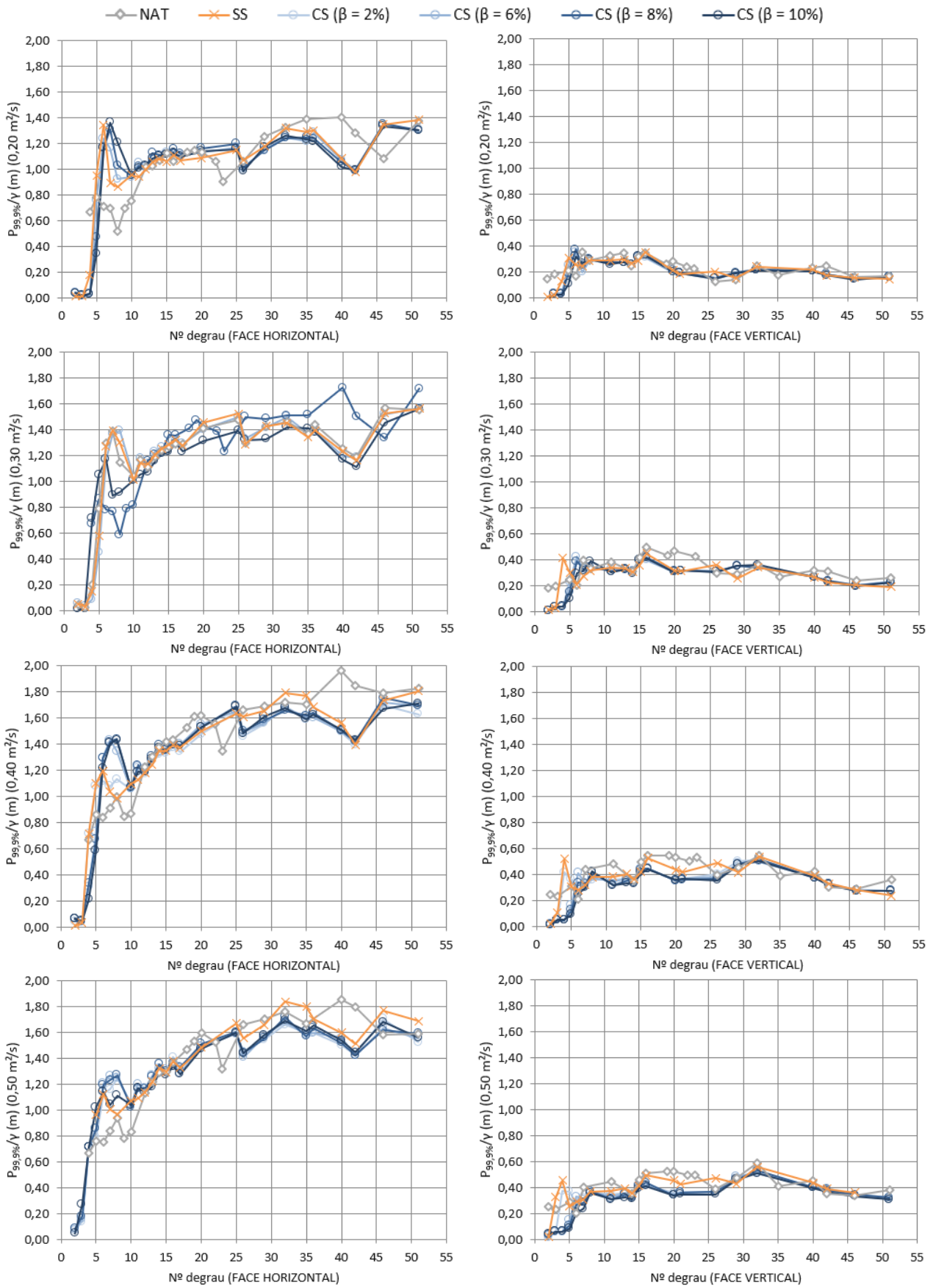


Figura 9.5 – Parâmetro  $P_{99,9\%}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, SS e CS, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

### 9.3 CONCLUSÕES

O objetivo geral do uso do soprador foi verificar o comportamento das pressões hidrodinâmicas sobre os degraus para diferentes quantidades de ar inseridas pelo sistema aerador. Foi possível verificar se, para coeficientes  $\beta$  maiores do que os naturalmente atingidos na condição SS, as pressões nas faces verticais e horizontais dos degraus seriam alteradas. De modo geral, os resultados obtidos demonstram que ocorreram mudanças apenas de forma localizada e nos parâmetros estatísticos mais extremos ( $P_{0,1\%}$ , principalmente). Isto é, quando avaliados os resultados de  $P_{0,1\%}$  para diferentes coeficientes  $\beta$ , identifica-se o aumento das pressões com o aumento de  $\beta$ .

Assim, os resultados estão em linha com os de Priebe (2020) – dado que a autora também identificou aumento na pressão extrema  $P_{0,1\%}$  na aeração induzida, quando comparada à aeração natural. Tais resultados são diferentes dos apontados por Novakoski (2021), que não constatou variação significativa no parâmetro. Contudo, deve-se ressaltar que a conclusão de Novakoski (2021) está associada à condição SS, assim, supostamente, a quantidade de ar inserida pelo aerador nessa configuração não foi suficiente para impactar na pressão do escoamento nos dados medidos pela autora.

Ou seja, aparentemente, considerando escoamentos à superfície livre, há uma quantidade mínima de ar necessária para que seja observado aumento no valor da pressão do escoamento sobre a estrutura. Já no caso de escoamento em conduto forçado, possivelmente a variação nas pressões é mais expressiva, mesmo quando a concentração de ar é baixa. Isso porque, conforme observado por Peterka (1953) e Dong e Su (2006), houve aumento expressivo nas pressões até mesmo quando a concentração de ar média no escoamento era da ordem de 5% ou menos.

Além disso, é importante destacar que as diferenças nas pressões encontradas por Peterka (1953) e Dong e Su (2006) ocorreram na avaliação da pressão média do escoamento. Já no caso dos dados aqui obtidos, só é possível identificar aumento mais expressivo nas pressões (com o aumento do coeficiente  $\beta$ ) quando se está avaliando os resultados da pressão extrema  $P_{0,1\%}$ . Aqui, quando avaliados os resultados de  $P_{med}$ , não foi possível identificar variações consideráveis nos dados, com o aumento do coeficiente  $\beta$ , o que contraria as conclusões de Peterka (1953) e Dong e Su (2006).

Nos casos aqui avaliados, ainda que as configurações de aeração induzida (SS e CS) não tenham atuado de forma a aumentar os valores de pressão em todos os parâmetros estatísticos analisados, as alterações observadas, em especial, no parâmetro  $P_{0,1\%}$  na região de *blackwater*, indicam que maiores valores de  $\beta$  podem contribuir diretamente na redução de chance de ocorrência de cavitação e consequente dano na estrutura. Tais resultados orientaram a definição

dos objetivos e da metodologia da presente pesquisa: a instalação do sistema aerador em posições mais a jusante na calha tende a resultar em coeficiente  $\beta$  superior (devido aos maiores valores do número de Froude do escoamento na entrada do defletor  $Fr_0$ ), se comparado ao sistema posicionado no início do canal em degraus e, conseqüentemente, pode contribuir na amenização das pressões extremas (principalmente,  $P_{0,1\%}$ ).

Ou seja, aparentemente, a instalação do aerador em porções mais a jusante na calha pode reduzir a chance de ocorrência de pressões negativas associadas à cavitação. Ademais, dado que a entrada de ar pelo sistema seria maior, ainda que existissem condições favoráveis à ocorrência de cavitação, é possível que a quantidade de ar inserida seria suficiente para evitar o aparecimento de danos em decorrência desse fenômeno. Contudo, entende-se que, para avaliar com mais precisão o efeito do sistema aerador no que diz respeito à redução dos riscos de danos associados à cavitação, é necessário investigar também os perfis de concentração de ar no escoamento.



## 10 APÊNDICE B

### POSICIONAMENTO DO SISTEMA AERADOR NA CALHA EM DEGRAUS

A verificação do melhor posicionamento do sistema aerador em uma calha de vertedouro pode ser feita por meio da estimativa do índice de cavitação ( $\sigma$ ), representado pela Equação 10.1. Quando o índice  $\sigma$  em um determinado ponto da calha é inferior ao índice de cavitação considerado crítico naquela situação ( $\sigma_c$ ), isto é, quando  $\sigma < \sigma_c$ , então, nesses casos, a instalação de um sistema aerador pode representar uma alternativa interessante para se evitar os possíveis danos decorrentes da cavitação. A Figura 10.1 ilustra essa condição.

$$\sigma = \frac{P - P_v}{\rho_w \frac{V^2}{2}}$$

Equação 10.1

onde

$P$  é a pressão no ponto em análise [Pa];

$P_v$  é a pressão de vapor da água [Pa];

$\rho_w$  é a massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>];

$V$  é a velocidade no ponto em análise [m/s].

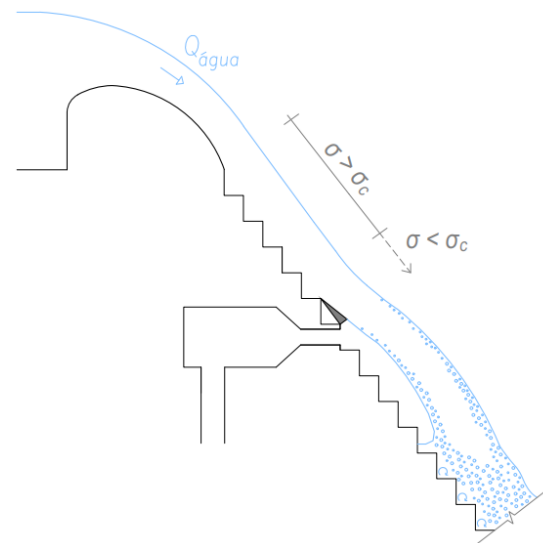


Figura 10.1 – Representação esquemática, em vista lateral, de metodologia para posicionamento do sistema aerador.

Neste trabalho foram avaliados dois critérios para a definição da posição do sistema aerador na calha. Um deles considera a comparação do índice  $\sigma$ , calculado no escoamento, com os índices críticos  $\sigma_c$  adotados em vertedouros em degraus, segundo recomendações da literatura (apresentadas no item 3.2.2). O outro critério, sugerido por Matos et al. (2022), estima os índices críticos  $\sigma_c$  segundo uma abordagem que considera as pressões extremas negativas ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ) nas faces verticais dos degraus. Ambos os critérios estão descritos na sequência.

Os métodos foram aplicados considerando que os resultados associados à instalação experimental do presente trabalho (que possui altura de degrau  $h_d = 0,06$  m) fossem transpostos para a escala real, associada a diferentes protótipos genéricos, considerando as escalas geométricas de 1:10, 1:15 e 1:20 (portanto, protótipos que possuem  $h_d$  igual a, respectivamente, 0,60 m, 0,90 m e 1,20 m). Ainda, as análises realizadas consideram duas vazões específicas, de 0,20 m<sup>2</sup>/s e 0,50 m<sup>2</sup>/s (associadas à escala da instalação experimental, ou, nesse caso, do modelo físico reduzido).

Vale destacar que, na etapa de avaliação do posicionamento do sistema aerador na calha, considera-se escoamento submetido à aeração natural.

### 10.1 CRITÉRIO 1: ÍNDICE $\sigma$ X ÍNDICES CRÍTICOS $\sigma_c$ DA LITERATURA

Neste critério, o cálculo do índice de cavitação  $\sigma$  (Equação 10.1) considerou a pressão  $P$  como sendo a pressão hidrostática do escoamento sobre a calha, somada à pressão atmosférica  $P_{atm}$  local (no caso,  $P_{atm} = 10,33 \text{ m}$ ). Considerou-se a pressão de vapor  $P_v$  à temperatura de  $20^\circ\text{C}$  ( $P_v = 0,24 \text{ m}$ , em termos de pressão absoluta). A profundidade ao longo do vertedouro na zona de escoamento não aerado foi estimada de acordo com metodologia proposta por Meireles et al. (2012), apresentada no item 5.1.1 (Equação 5.1).

A Figura 10.2 apresenta o índice de cavitação  $\sigma$  calculado para diferentes escalas geométricas de protótipo (1:10; 1:15 e 1:20), considerando as vazões específicas em modelo  $q$  iguais a  $0,20$  e  $0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . O valor do índice de cavitação crítico  $\sigma_c$  adotado foi de  $0,90$ , recomendação de Pfister et al. (2006a), que, conforme trabalhos apresentados no item 3.2.2, é a mais favorável à segurança. Na Figura 10.2, a região em que  $\sigma < \sigma_c$  (isto é,  $\sigma < 0,90$ ) está em destaque (preenchimento vermelho), uma vez que diz respeito às situações em que há chance de ocorrência de cavitação no escoamento.

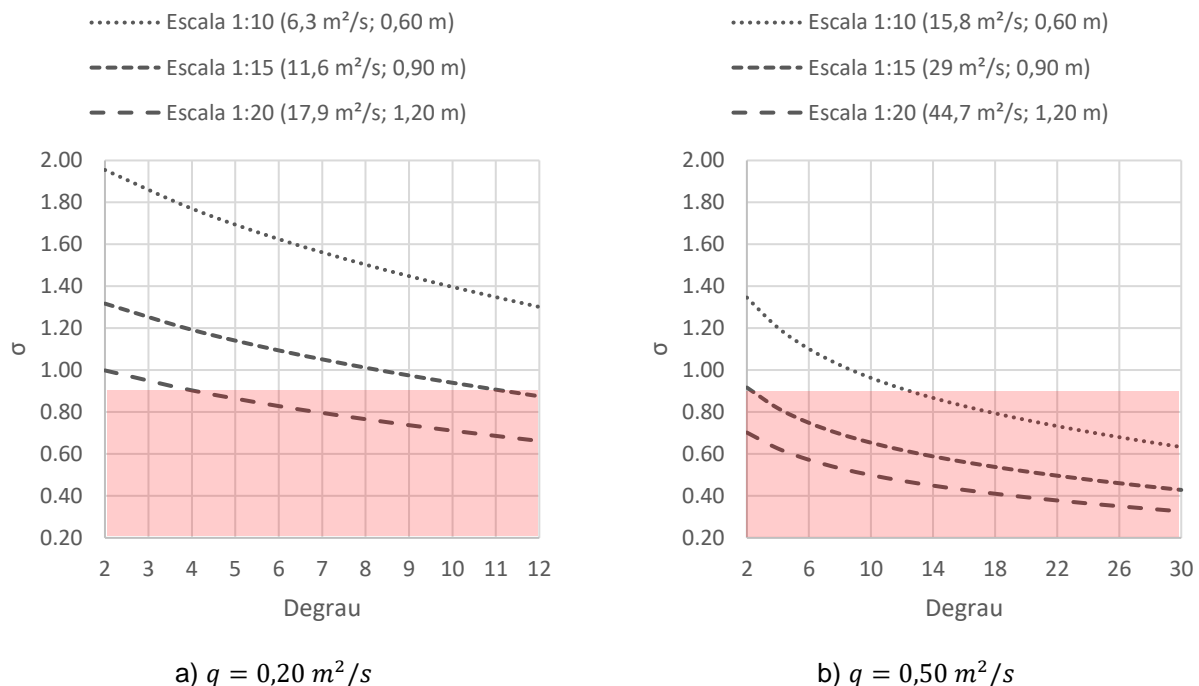


Figura 10.2 – Índice de cavitação do escoamento  $\sigma$ , ao longo da calha, para diferentes vazões específicas  $q$  e alturas de degrau  $h_d$  (representando diferentes protótipos).

Foram avaliados apenas os trechos a montante do ponto de início de aeração natural do escoamento, ponto este também estimado com base em Meireles et al. (2012), conforme item 5.1.1 (Equação 5.3). Por isso, na Figura 10.2a ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ ), o eixo das abscissas finaliza no degrau nº12, enquanto na Figura 10.2b ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ) avança até o degrau nº30.

Se considerada a escala geométrica 1:10 (protótipo com degraus de 0,60 m de altura), o critério adotado indica a necessidade de colocação de sistema aerador nas proximidades do degrau nº12, dado que, conforme Figura 10.2b, a partir de então tem-se  $\sigma < \sigma_c$ . Ainda na escala 1:10, se considerada a menor vazão específica avaliada (igual a 6,30 m<sup>2</sup>/s, associada a  $h_d = 0,60$  m), tem-se  $\sigma > \sigma_c$  em todo o trecho não aerado da calha, sendo assim, nesses casos, não haveria a necessidade de sistema aerador na estrutura. Por outro lado, se considerada a escala geométrica 1:20 ( $h_d = 1,20$  m), haveria a necessidade de instalação do sistema aerador nas proximidades do degrau nº4 (considerando  $q = 0,20$  m<sup>2</sup>/s, conforme Figura 10.2a) ou, inclusive, nas proximidades da ogiva do vertedouro (quando  $q = 0,50$  m<sup>2</sup>/s, Figura 10.2b).

## 10.2 CRITÉRIO 2: MÉTODO DE MATOS ET AL. (2022)

O segundo critério consiste na aplicação da metodologia proposta por Matos et al. (2022) para determinação das zonas submetidas a riscos de cavitação em vertedouros em degraus com inclinação de calha igual a 1V:0,75H ( $\approx 53^\circ$ ). O método está baseado na determinação da velocidade crítica do escoamento  $V_c$  ao longo da calha, pela Equação 10.2, com base no uso do coeficiente de pressão  $C_p$  (Equação 10.3), como sugerido por Amador et al. (2009), dentre outros. O parâmetro  $C_p$  pode ser estimado por meio da Equação 10.4, também proposta por Matos et al. (2022), associado a pressões extremas negativas ( $P_{x\%}$ ), com probabilidades de não excedência de 0,1% ( $C_{p0,1\%}$ ), 1% ( $C_{p1\%}$ ) e 5% ( $C_{p5\%}$ ), na face vertical dos degraus, com coeficientes indicados na Tabela 10.1. Nesse caso, a determinação do índice de cavitação crítico  $\sigma_c$  se dá pela utilização da Equação 10.1, considerando a velocidade do escoamento igual à  $V_c$ , ao passo que a estimativa do índice de cavitação do escoamento  $\sigma$  é feita da mesma forma como indicado no item 10.1.

$$V_c = \sqrt{\frac{2g P_v/\gamma}{C_p}} \quad \text{Equação 10.2}$$

$$C_{px\%} = \frac{P_{x\%}/\gamma}{V^2/2g} \quad \text{Equação 10.3}$$

$$C_p = \frac{a + bL'_{NAT}}{1 + cL'_{NAT} + dL'_{NAT}{}^2} \quad \text{Equação 10.4}$$

Tabela 10.1 – Coeficientes da Equação 10.4.

	a	b	c	d
$C_{p0,1\%}$	-0,6507	-0,0094	0,0421	0,0024
$C_{p1\%}$	-0,4210	-0,0072	0,0440	0,0024
$C_{p5\%}$	-0,2626	-0,0054	0,0459	0,0023

Além do critério recém descrito, Matos et al. (2022) também propuseram a avaliação do índice de cavitação crítico  $\sigma_c$  com base no coeficiente de atrito na região de escoamento não aerado. Porém,

este método não foi considerado no presente trabalho, dado que foi, de modo geral, menos conservador do que o critério de  $C_p$ .

A Figura 10.3 apresenta os resultados da utilização do método descrito, isto é, os índices de cavitação críticos associados a pressões extremas negativas com probabilidades de não excedência de 0,1% ( $\sigma_c C_{p0,1\%}$ ), 1% ( $\sigma_c C_{p1\%}$ ) e 5% ( $\sigma_c C_{p5\%}$ ), bem como o índice de cavitação do escoamento ( $\sigma$ ). Além destes, na Figura 10.3 também constam os resultados da estimativa da concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  segundo Matos (1999) – Equação 3.7. Vale lembrar que a Figura 10.3 tem como base a aplicação da metodologia de Matos et al. (2022) em protótipos com alturas de degrau  $h_d$  iguais a 0,60 m, 0,90 m e 1,20 m, associados a duas vazões específicas  $q$  em modelo ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ), do mesmo modo como desenvolvido no item 10.1.

Para definição da região suscetível a danos, levou-se em consideração a série associada à  $\sigma_c C_{p0,1\%}$ , por ser o critério mais favorável à segurança (de qualquer forma, na Figura 10.3 também constam as linhas associadas a  $\sigma_c C_{p1\%}$  e  $\sigma_c C_{p5\%}$ ). Sendo assim, nesse caso, nas zonas em que  $\sigma < \sigma_c C_{p0,1\%}$  há chance de ocorrência de cavitação no escoamento. Porém, como exposto no item 3.3, regiões em que o escoamento apresenta concentração de ar superior a cerca de 7% estão protegidas dos possíveis efeitos danosos da cavitação, segundo conclusões de Peterka (1953). Assim, na Figura 10.3, a região em destaque (com preenchimento vermelho) compreende a zona onde  $\sigma < \sigma_c C_{p0,1\%}$  e  $C_b < 7\%$ , representando, portanto, a região suscetível a danos.

Como sugere a Figura 10.3, como esperado, as conclusões são dependentes da altura do degrau considerado, bem como da vazão do escoamento associada. De forma geral, os resultados indicam que, na região de início de aeração natural no escoamento (local onde a concentração de ar no fundo  $C_b$  passa a ser superior a zero), tem-se índice de cavitação crítico  $\sigma_c C_{p0,1\%} \approx 0,70$ . Esse valor é próximo ou superior àqueles indicados por Frizell et al. (2013) e Pfister e Boes (2014) – da ordem de 0,50 a 0,70 – e inferior ao de Pfister et al. (2006a) – igual a 0,90 – conforme item 3.2.2.

Quando avaliados os resultados associados à  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 10.3a, c, e), apenas no caso de  $h_d = 1,20 \text{ m}$  haveria a necessidade de instalação de aerador (nesse caso, nas proximidades do degrau nº10, como sugere a Figura 10.3c). Já nos casos associados à  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (Figura 10.3b, d, f), os resultados apontam a necessidade de instalação de aerador nas proximidades do degrau nº20 (para  $h_d = 0,60 \text{ m}$ , Figura 10.3b), ou, então, do degrau nº10 (para  $h_d = 0,90 \text{ m}$ , Figura 10.3d e para  $h_d = 1,20 \text{ m}$ , Figura 10.3f).

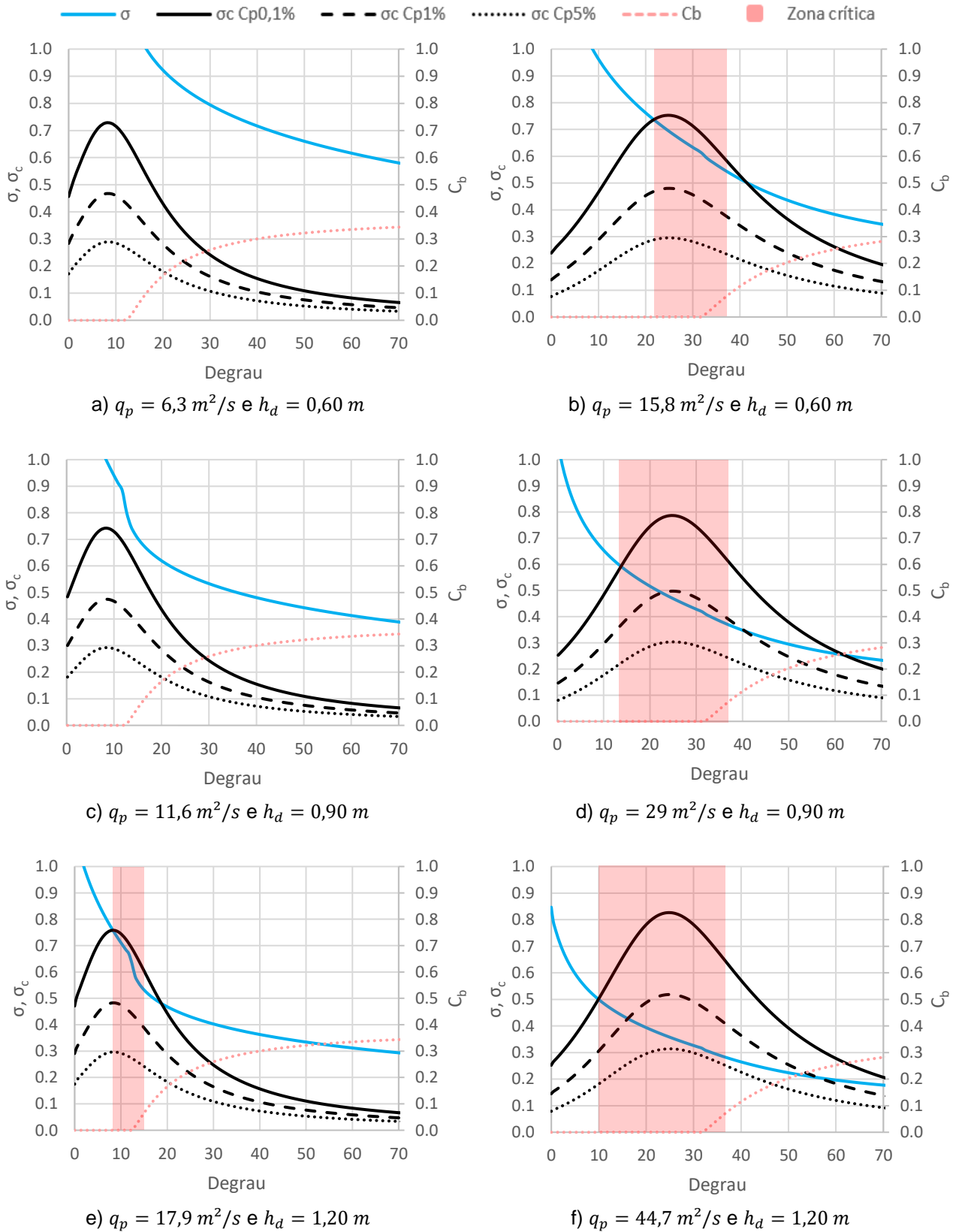


Figura 10.3 – Índice de cavitação do escoamento  $\sigma$  e índice de cavitação crítico  $\sigma_c$ , ao longo da calha, para diferentes vazões específicas em protótipo  $q_p$  e alturas de degrau  $h_d$  (representando diferentes protótipos). Os gráficos à esquerda estão associados a vazões específicas em modelo  $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$  e os da direita dizem respeito à  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

### 10.3 CONCLUSÕES

A escolha otimizada do local para instalação do sistema aerador varia de acordo com diferentes parâmetros, podendo-se citar a escala geométrica considerada, as vazões de dimensionamento, o método de  $\sigma_c$  selecionado, dentre outros. De modo geral, segundo os critérios analisados, considerando que a instalação experimental do presente trabalho representasse um modelo físico reduzido associado a um protótipo com  $h_d = 0,60 \text{ m}$ , para a vazão específica máxima ensaiada ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ), conclui-se que a instalação do sistema aerador nas proximidades do degrau nº10 seria uma opção interessante. Por outro lado, quando avaliados os resultados associados a um protótipo com  $h_d = 1,20 \text{ m}$ , embora o método proposto por Matos et al. (2022) indique a necessidade de instalação de aerador na região do degrau nº10, quando analisados os resultados do critério exposto no item 10.1 vê-se que a alternativa de se posicionar o aerador nas proximidades da ogiva do vertedouro não poderia ser descartada.

Sendo assim, no presente trabalho, opta-se pela avaliação do escoamento nas condições de sistema aerador posicionado tanto nas proximidades da ogiva do vertedouro (aqui denominada condição  $D_1$ ), quanto mais a jusante, no degrau nº10 (condição  $D_{10}$ ). O sistema aerador posicionado nas proximidades da ogiva do vertedouro pode ser uma alternativa interessante especialmente para barragens de altura reduzida, onde a instalação do aerador em zonas mais a jusante seria inviável. Já no caso de barragens mais altas, a colocação do aerador mais a jusante na calha pode ser uma opção vantajosa, já que possibilita a inserção de maiores vazões de ar no escoamento (conforme apresentado no item 5.3).

## 11 APÊNDICE C

### PERFIL DE VELOCIDADES NO TUBO DE ENTRADA DE AR DO AERADOR

Para construção do perfil de velocidades do ar no dispositivo adutor, instalou-se a sonda Pitot-Prandtl<sup>69</sup> em sete posições ao longo dos 69 mm internos do diâmetro do tubo (a distâncias de 4, 10, 22, 32, 43, 54 e 63 mm). A velocidade média do ar em cada uma das sete posições foi tida como a média de todos os valores adquiridos ao longo de 10 minutos de ensaio, a uma frequência de aquisição de dados de 100 Hz. A metodologia descrita foi adotada em duas medições consecutivas (denominadas ensaios “A” e “B”), com o sistema aerador na condição  $D_1$  (isto é, instalado nas proximidades do primeiro degrau da calha), considerando a vazão de 41 l/s de água escoando pelo modelo. Os resultados desse procedimento estão exibidos na Figura 11.1.

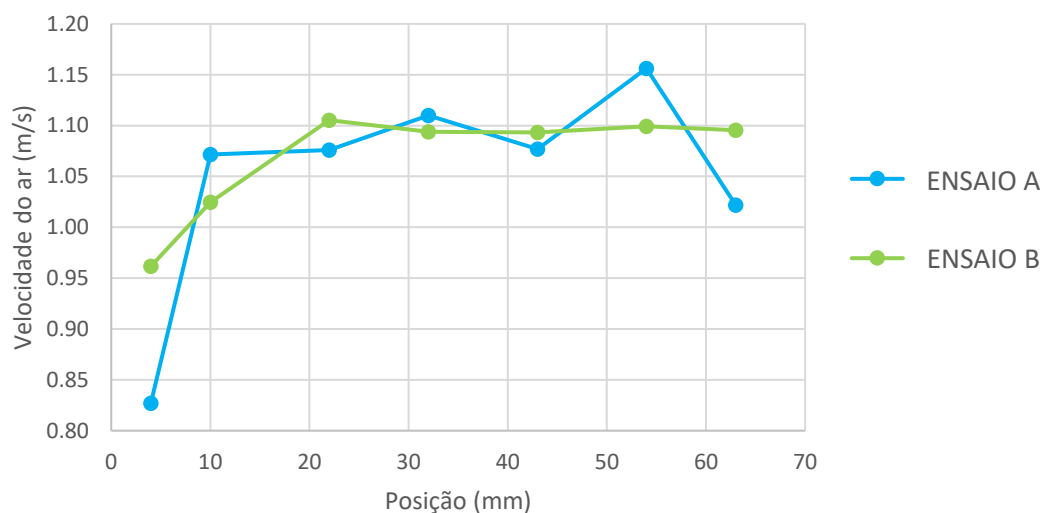


Figura 11.1 – Perfil de velocidades no interior do tubo de entrada de ar, ao longo de seu diâmetro.

As medições realizadas apontam um perfil de velocidades de ar aproximadamente horizontal ao longo do diâmetro do tubo – nesse caso, a velocidade do escoamento resultou igual a 1,10 m/s, aproximadamente, conforme Figura 11.1. As variações mais significativas ocorreram apenas nas proximidades das paredes do tubo (posições menores do que 10 mm e maiores do que 50 mm).

As próximas definições constam em White (2011), valendo a ilustração dada pela Figura 11.2. No escoamento incompressível em um duto circular, o perfil de velocidades típico  $v$  é dado aproximadamente pela Equação 11.1, valendo  $m = 1/7$  no regime turbulento, de modo que a velocidade média  $V_{med}$  é representada pela Equação 11.2. Escoamentos de gases podem se comportar como se fossem incompressíveis se a velocidade do gás for menor do que 30% da velocidade do som no gás ( $a$ ). Para escoamento de ar a 20°C, tem-se  $a \approx 340$  m/s. Com base na Figura 11.1 e nos resultados de velocidade do ar medidos nos ensaios deste trabalho, a razão entre

<sup>69</sup> As características do referido instrumento constam no item 4.3.1.

a velocidade do escoamento medida e a velocidade do som no gás é sempre muito inferior a 30%, valendo, nesse caso, a consideração de escoamento incompressível.

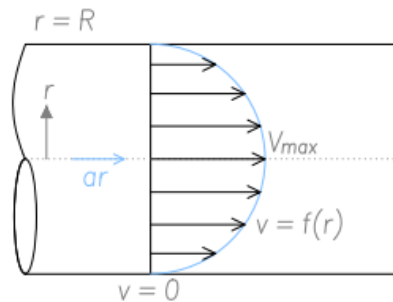


Figura 11.2 – Ilustração do perfil de velocidades em escoamento em duto circular. Adaptado de White (2011).

$$v = V_{max} \left(1 - \frac{r}{R}\right)^m \quad \text{Equação 11.1}$$

$$V_{med} = V_{max} \frac{2}{(1+m)(2+m)} \quad \text{Equação 11.2}$$

onde (ver Figura 11.2)

$v$  é o perfil de velocidades do escoamento;

$V_{max}$  é a velocidade máxima do escoamento (no eixo da tubulação);

$V_{med}$  é a velocidade média do escoamento;

$r$  é um raio genérico, desde  $r = 0$  até  $r = R$ ;

$R$  é o raio da tubulação;

$m$  é constante e igual a 1/7 em escoamento turbulento.

Assim, pela Equação 11.2 tem-se  $V_{med} \approx 0,82 V_{max}$ , ou seja, a velocidade média do escoamento é apenas ligeiramente menor do que a máxima. Lembrando que, neste caso, está se levando em conta a distribuição típica de velocidades  $v$ , dada pela Equação 11.1.

Desta forma, ao longo dos ensaios, julgou-se válido medir a velocidade do ar apenas no eixo do tubo adutor, considerando a respectiva medida equivalente à média de velocidades para todo o diâmetro da tubulação. Tendo em conta esta consideração, os resultados apresentados na Figura 11.1 também indicam que possíveis desvios no posicionamento da sonda Pitot-Prandtl não terão impacto relevante nas medidas de velocidade do ar (uma vez que o perfil de velocidades medido resultou aproximadamente constante na vizinhança do eixo da tubulação).



## 12 APÊNDICE D

### CARACTERÍSTICAS DOS TRANSDUTORES DE PRESSÃO

A Tabela 12.1 e a Tabela 12.2 apresentam as principais características dos transdutores de pressão utilizados, respectivamente, nas faces horizontal (H) e vertical (V) dos degraus. A faixa de medição dos transdutores está indicada em unidades de coluna piezométrica (m), e a exatidão com relação ao fundo de escala (FE).

Para as três configurações utilizadas (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ), os ensaios ocorreram em momento distinto e, entre outros motivos, devido à disponibilidade dos transdutores no laboratório, alguns degraus não possuem instrumentos com as mesmas características para as três configurações. Além disso, conforme mencionado no item 4 (METODOLOGIA), os dados das condições NAT e  $D_1$  são provenientes de estudos de outros pesquisadores e, sendo assim, a disposição dos instrumentos nos degraus atende aos objetivos de cada um dos trabalhos em particular. Entende-se, contudo, que a distinção entre parte dos instrumentos utilizados nas três configurações não prejudica a comparação entre os resultados. Os dados adquiridos nos ensaios não excederam as faixas de medições dos instrumentos em nenhuma condição.

Entre os degraus nº1 e 10, o escoamento na condição  $D_{10}$  é semelhante à condição NAT e, sendo assim, nessa região, os resultados da condição  $D_{10}$  foram considerados equivalentes aos da condição NAT. Por esse motivo, não foram posicionados instrumentos no trecho entre os degraus nº1 e 10 na condição  $D_{10}$  (dado que serão considerados os mesmos resultados da condição NAT, já medida), conforme pode ser observado na Tabela 12.1 e na Tabela 12.2.

Tabela 12.1 – Características dos transdutores de pressão conectados na face horizontal dos degraus.

Face horizontal (H+nº degrau)	Aeração natural (NAT)			Aeração induzida (D <sub>1</sub> )			Aeração induzida (D <sub>10</sub> )		
	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)
H2	-	-	-	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	-	-	-
H3	-	-	-	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	-	-	-
H4	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	-	-	-
H5	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	H - TM25	- 0,5 a 1,5	0,25%	-	-	-
H6	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-
H7	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-
H8	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-
H9	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-	-	-	-
H10	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	-	-	-
H11	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
H12	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H13	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H14	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H15	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H16	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H17	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H18	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H19	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H20	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H21	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H22	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H23	H - TM25	- 0,5 a 1,5	0,25%	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H24	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H25	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H26	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H28	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H29	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H30	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H31	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H32	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H33	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H34	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H35	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H36	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	O - PX419	- 3,5 a 3,5	0,08%
H37	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H39	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H40	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H41	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H42	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H43	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H45	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H46	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%
H47	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H48	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H50	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%
H51	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%

\*Sendo: O – Omega, S – Sitron e H – Hytronic.

Tabela 12.2 – Características dos transdutores de pressão conectados na face vertical dos degraus.

Face vertical (V+nº degrau)	Aeração natural (NAT)			Aeração induzida (D <sub>1</sub> )			Aeração induzida (D <sub>10</sub> )		
	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)	Marca*-modelo	Faixa (m)	Exatidão (% FE)
V2	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	-	-	-
V3	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	-	-	-
V4	-	-	-	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	-	-	-
V5	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-
V6	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-
V7	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-
V8	S - SP96	- 0,7 a 2,75	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-
V9	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V10	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V11	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 0,7 a 0,7	0,08%
V12	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V13	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V14	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V15	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V16	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V17	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V18	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V19	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V20	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	S - SP96	- 1,5 a 3,0	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V21	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-
V22	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%	-	-	-	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V23	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V24	-	-	-	-	-	-	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V25	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V26	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V28	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V29	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V30	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V31	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V32	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-
V33	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V34	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V35	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V36	-	-	-	-	-	-	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V37	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V39	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V40	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-
V41	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V42	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V43	-	-	-	-	-	-	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V45	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V46	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	O - PX419	- 1,75 a 1,75	0,08%
V47	-	-	-	-	-	-	-	-	-
V48	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V50	-	-	-	-	-	-	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%
V51	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	S - SP96	- 1,5 a 1,5	0,5%	-	-	-

\*Sendo: O – Omega, S – Sitron e H – Hytronic.

## 13 APÊNDICE E

### INTERVALOS DE VALIDADE DE EQUAÇÕES DE OUTROS AUTORES E DO PRESENTE TRABALHO

Tabela 13.1 – Intervalos considerados no estabelecimento de equações de previsão do coeficiente  $\beta$  e do comprimento do jato  $L_j$ .

		$\alpha$ (graus)	$\theta$ (graus)	$h_d$ (m)	$t$ (m)	$Fr_0$	$h_0$ (m)	$t/h_0$	$h_d/h_0$	$h_c/h_d$
COEFICIENTE $\beta$	Pfister et al. (2006b) Equação 3.24	50	NA	0,093	NA	3,20 - 6,00	0,03 - 0,13	NA	0,71 - 3,32	0,97 - 3,11
	Zamora et al. (2008) Equação 3.25	50	NA	0,093	NA	2,70 - 5,50	ND	NA	ND	ND
	Pfister e Hager (2010b) Equação 3.26	0 - 50	0 - 11,30	NA	0 - 0,027	5,80 - 16,10	0,04 - 0,094	0,06 - 2,10 <sup>a</sup>	NA	NA
	Terrier (2016) Equação 3.27 e Equação 3.28	30 e 50	5,71 - 14,04	0,03 e 0,06	0,015 - 0,045	3,20 - 7,50	0,052 - 0,092	0,16 - 0,60	0,65 - 1,15	2,7 - 9,6
	Presente trabalho Equação 5.7	53,13	7,60	0,06	0,01	3,05 - 6,10	0,020 - 0,140	0,07 - 0,50	0,43 - 3,00	1,1 - 4,9
COMPRIMENTO DO JATO $L_j$	Pfister e Hager (2010a) Equação 3.31	12 - 50	0 - 11,3	NA	0 - 0,027	5,80 - 10,40	0,04 - 0,094	0,10 - 2,10 <sup>a</sup>	NA	NA
	Pfister et al. (2006a) Equação 3.32	50	8,13	0,093	0,008	2,70 - 5,80	0,033 - 0,197	0,04 - 0,24	0,47 - 2,83	1,0 - 3,0 <sup>b</sup>
	Terrier (2016) Equação 3.33	30 e 50	5,71 - 14,04	0,03 e 0,06	0,015 - 0,045	3,20 - 10,40	0,052 - 0,092	0,16 - 0,60	0,65 - 1,15	2,7 - 9,6
	Presente trabalho Equação 5.4 até Equação 5.6	53,13	7,60	0,06	0,01	3,05 - 6,10	0,020 - 0,140	0,07 - 0,50	0,43 - 3,00	1,1 - 4,9

<sup>a</sup>Nesse caso, o parâmetro representativo é  $(t + d)/h_0$  (ver Figura 3.14).

<sup>b</sup>Porém, os autores consideraram casos até  $h_c/h_d = 4,54$

ND	Não disponível
NA	Não se aplica

Tabela 13.2 – Intervalos considerados no estabelecimento de equações de previsão de pressões e de concentração de ar  $C_b$ .

		$\alpha$ (graus)	$\theta$ (graus)	$h_d$ (m)	$t$ (m)	$Fr_0$	$h_0$ (m)	$t/h_0$	$h_d/h_0$	$h_c/h_d$
PRESSÃO	Presente trabalho Equação 5.9	53,13	7,60	0,06	0,01	3,05 - 5,23	0,053 - 0,14	0,07 - 0,19	0,43 - 1,13	2,7 - 4,9
CONCENTRAÇÃO DE AR NO FUNDO $C_b$	Matos (1999) Equação 3.7	53,13	NA	0,08 <sup>c</sup>	NA	NA	NA	NA	NA	1,1 - 2,0
	Pfister et al. (2006a) Equação 3.36 e Equação 3.37	50	8,13	0,093	0,008	2,70 - 5,80	0,033 - 0,197	0,04 - 0,24	0,47 - 2,83	1,0 - 3,0 <sup>b</sup>
	Terrier (2016) Equação 3.39 até Equação 3.41	30 e 50	5,71 - 14,04	0,03 e 0,06	0,015 - 0,045	3,20 - 7,50	0,052 - 0,092	0,16 - 0,60	0,65 - 1,15	2,7 - 9,6
	Presente trabalho Condição D <sub>1</sub>	53,13	7,60	0,06	0,01	3,05 - 3,95	0,064 - 0,140	0,07 - 0,16	0,43 - 0,94	2,7 - 4,9
	Presente trabalho Condição D <sub>10</sub>	53,13	7,60	0,06	0,01	4,50 - 5,23	0,053 - 0,108	0,09 - 0,19	0,56 - 1,13	2,7 - 4,9

<sup>b</sup>Porém, os autores consideraram casos inseridos no intervalo  $h_c/h_d = 4,54$ .

<sup>c</sup>No início da calha em degraus há uma zona de transição com  $0,005 m \leq h_d \leq 0,04 m$ .

ND	Não disponível
NA	Não se aplica

## 14 APÊNDICE F

### VERIFICAÇÃO DE EQUAÇÕES DE PREVISÃO PROPOSTAS NESTE TRABALHO, UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS DE OUTROS MODELOS FÍSICOS

Tem-se aqui a comparação das equações de previsão do comprimento do jato  $L_j$ , do coeficiente de entrada de ar  $\beta$  e das pressões sobre os degraus, propostas neste trabalho, com dados de outros modelos. Foram utilizados dados experimentais adquiridos em dois modelos físicos semelhantes ao utilizado neste trabalho, aqui denominados LAHE I e LAHE II. Estes modelos foram construídos nas instalações experimentais de Furnas Centrais Elétricas e suas características principais estão destacadas na Tabela 14.1.

Tabela 14.1 – Características principais dos modelos LAHE I e II frente ao modelo do presente trabalho.

	Modelo presente trabalho	Modelo LAHE I	Modelo LAHE II
Altura do degrau $h_d$	0,06 m	0,09 m	0,03 m
Declividade da calha	1V:0,75H ( $\alpha \approx 53^\circ$ )	1V:0,75H ( $\alpha \approx 53^\circ$ )	1V:0,75H ( $\alpha \approx 53^\circ$ )
Largura da calha	0,50 m	1,15 m	1,15 m
Altura de defletor $t$	0,010 m	0,015 m	0,005 m
Diâmetro do tubo entrada de ar $\phi$	0,069 m	0,096 m	0,035 m
Escala geométrica (para protótipo com $h_d = 0,90$ m)	1:15	1:10	1:30
Faixa de vazões específicas $q$ em modelo	0,05 até 0,50 m <sup>2</sup> /s	0,10 até 0,356 m <sup>2</sup> /s	0,07 até 0,250 m <sup>2</sup> /s
Faixa de vazões específicas $q$ em protótipo	3 a 29 m <sup>2</sup> /s	3 até 11 m <sup>2</sup> /s	11 até 41 m <sup>2</sup> /s
Número total de degraus	60	20	60
Faixa de número de Froude $Fr_0$ avaliada	3,0 até 6,0	3,9 até 6,0	3,0 até 5,0
Faixa de número de Weber $We_0$ avaliada	45 até 180	70 até 135	45 até 110
Faixa de número de Reynolds $Re$ avaliada	$5,4 \times 10^4$ até $5 \times 10^5$	$9,9 \times 10^4$ até $3,5 \times 10^5$	$7 \times 10^4$ até $2,5 \times 10^5$
Faixa razão $t/h_0$ avaliada	0,07 até 0,50	0,16 até 0,50	0,07 até 0,16
Faixa razão $h_d/h_0$ avaliada	0,43 até 3,00	0,96 até 3,00	0,43 até 0,96

Resultados dos modelos LAHE I e LAHE II, considerando aeração induzida, estão explorados nas referências Novakoski et al. (2020), Novakoski (2021) e Ferla et al. (2022), e, considerando aeração natural no escoamento, em Sell (2020) e Canellas (2020).

Vale ressaltar que nenhum dos dados experimentais adquiridos nos modelos LAHE I e II foi utilizado no desenvolvimento das equações propostas neste trabalho. Todavia, deve-se destacar que os modelos LAHE I, LAHE II e o modelo que serviu de base no presente trabalho são instalações experimentais que consideram um protótipo de mesma altura de degraus e declividade de calha, como indicado na Tabela 14.1. Desse modo, é possível que o uso das instalações LAHE I e II na comparação com as equações propostas não seja independente no todo, visto que pode

haver certa relação entre os dados das referidas estruturas. Porém, na falta de outros dados atualmente disponíveis e divulgados, entende-se que a presente comparação é justa.

No caso do modelo LAHE I, em razão do reduzido número de degraus existente na calha (20 degraus, conforme Tabela 14.1), apenas a condição  $D_1$  foi ensaiada. Já no modelo LAHE II, foram consideradas as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  (isto é, sistema aerador posicionado nos degraus nº1 e 10, respectivamente). Com relação aos dados do modelo LAHE II, foram aqui considerados apenas os ensaios que resultaram em  $We_0 \geq 45$ , compatível ao valor mínimo desse parâmetro obtido no modelo do presente trabalho. Sendo assim, em alguns casos, é possível que os efeitos de escala nos resultados sejam importantes.

#### 14.1 COMPRIMENTO DO JATO $L_j$

Nos modelos LAHE I e II, a avaliação do comprimento do jato  $L_j$  ocorreu de forma visual e conforme os mesmos critérios adotados neste trabalho.

A Figura 14.1 exibe a razão  $L_j/h_0$  em função dos parâmetros  $\delta$  e  $\lambda$ , considerando resultados dos modelos LAHE I e II, juntamente com as equações de previsão aqui propostas (Equação 5.5 e Equação 5.6). Conforme indica a Figura 14.1, os dados de LAHE I e II são bem representados por ambos os ajustes propostos, seja pela Equação 5.5 (Figura 14.1a) ou pela Equação 5.6 (Figura 14.1b). Contudo, diferenças mais significativas (da ordem de 20%) entre os dados medidos e as equações de previsão ocorrem, de modo geral, quando  $L_j/h_0 > 15$ . Desse modo, conclui-se que tanto a Equação 5.5 quanto a Equação 5.6 podem conduzir a estimativas aceitáveis da relação  $L_j/h_0$ . Todavia, estas devem ser utilizadas com cautela nos casos em que  $L_j/h_0 > 15$ , além de resguardados os limites de validade, isto é, aqueles associados a casos compatíveis aos de elaboração das referidas equações.

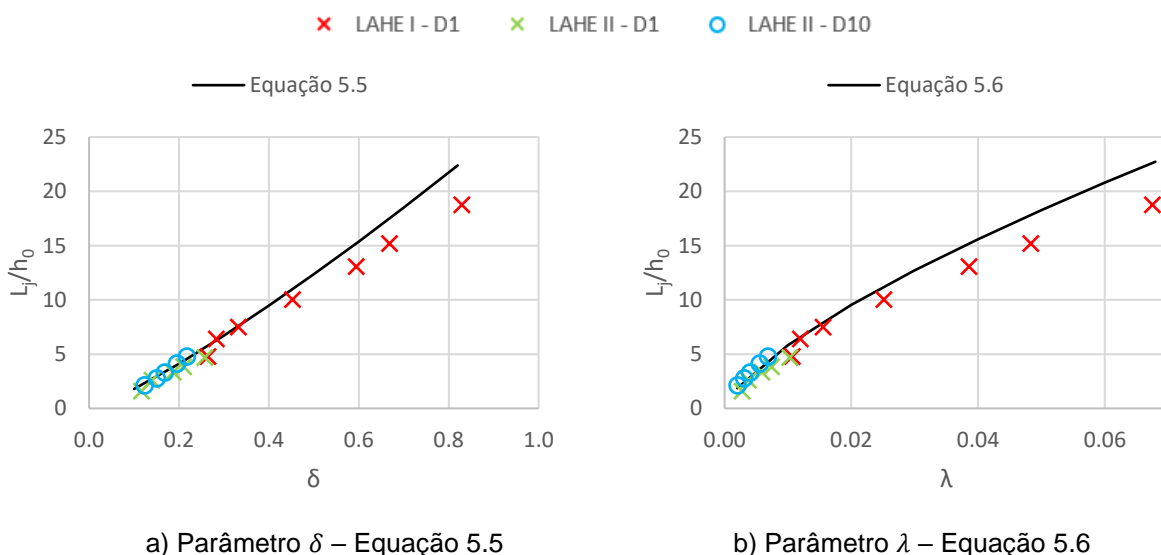


Figura 14.1 – Parâmetro  $L_j/h_0$  em função de  $\delta$  e  $\lambda$ , comparação com dados dos modelos LAHE I e II.

## 14.2 COEFICIENTE $\beta$

Nos modelos LAHE I e II, a estimativa da entrada de ar pelo sistema aerador foi realizada do mesmo modo e com os mesmos instrumentos que os utilizados neste trabalho. Ou seja, a velocidade do escoamento no duto de ar foi medida por meio de sonda Pitot-Prandtl (Dwyer 166-12) acoplada a um transmissor de pressão diferencial (Rücken RTBP-420-DIF). As velocidades de entrada de ar foram adquiridas a uma frequência de aquisição de 100 Hz, com a sonda Pitot-Prandtl no eixo do tubo adutor, de modo que a vazão de entrada de ar pelo sistema aerador foi estimada com base na média das velocidades obtidas ao longo de 10 minutos de ensaio.

A Figura 14.2 exibe o coeficiente de entrada de ar  $\beta$  em função do parâmetro  $\Psi$ , considerando os dados dos modelos LAHE I e II e a linha dada pela Equação 5.7 (como na Figura 5.19). Apenas os casos enquadrados na faixa de validade da Equação 5.7 foram considerados. Reforça-se que, no caso do LAHE I, em razão do reduzido número de degraus existente na calha, apenas a condição  $D_1$  foi ensaiada. Já no LAHE II, exploraram-se as condições  $D_1$  e  $D_{10}$ .

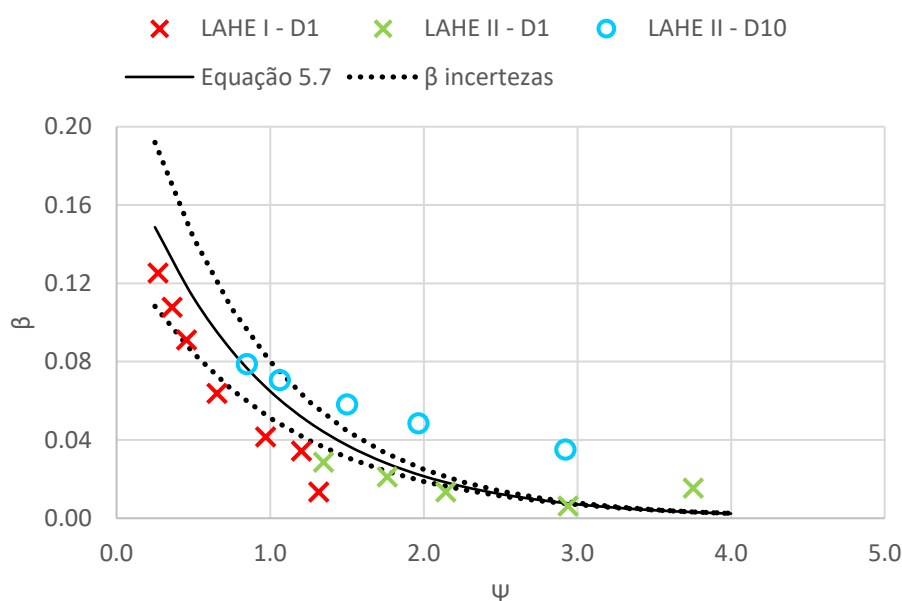


Figura 14.2 – Coeficiente de entrada de ar  $\beta$  em função do parâmetro  $\Psi$ , comparação com dados dos modelos LAHE I e II.

Pela Figura 14.2, é possível identificar que os dados do modelo LAHE I seguem a tendência dada pelo ajuste da Equação 5.7, estando, de modo geral, inseridos na área que abrange as incertezas do modelo proposto. Conforme Tabela 14.1, quando considerado um protótipo com altura do degrau  $h_d = 0,90\text{ m}$ , o modelo LAHE I possui escala geométrica 1:10, enquanto o modelo considerado no presente trabalho estaria associado à escala 1:15.

Ainda com relação à Figura 14.2, no caso do modelo LAHE II -  $D_1$ , o ajuste dado pela Equação 5.7 também parece satisfatório. Porém, considerando os dados de LAHE II -  $D_{10}$ , embora a tendência de comportamento dos dados seja semelhante à indicada pela Equação 5.7, os resultados obtidos



estão deslocados, podendo ser estimados adequadamente pela Equação 5.7 apenas quando  $\Psi < 1,50$ , aproximadamente.

Para um protótipo com  $h_d = 0,90 \text{ m}$ , o modelo LAHE II estaria associado à escala geométrica 1:30, portanto, é razoável admitir a existência de efeitos de escala significativos nos resultados. Cabe mencionar que Sell (2020), quando da avaliação dos dados associados à aeração natural no modelo LAHE II, identificou a ocorrência de efeitos de escala não desprezáveis nos resultados. Desse modo, é lícito supor a ocorrência dos mesmos efeitos nos dados associados à aeração induzida no escoamento sobre esse modelo.

De fato, quando avaliada a razão  $\Delta p/h_0$  nos dados do LAHE II (considerando  $\Delta p$  a pressão medida no degrau mais próximo da câmara de ar) foram obtidos valores que, quase na totalidade dos casos, superam o limite recomendado por Pfister (2011) – que é de  $\Delta p/h_0 \leq 0,10$ , como apresentado no item 3.4.1. Isso pode estar ocorrendo em razão do diâmetro do tubo de entrada de ar neste modelo, que é pequeno (igual a 0,035 m, ver Tabela 14.1), o que pode estar contribuindo com perdas de carga consideráveis na sucção de ar e, assim, ocasionando uma subpressão relevante sob o jato – principalmente na condição D<sub>10</sub>, onde a velocidade de entrada de ar pelo tubo adutor é maior do que na condição D<sub>1</sub>.

A Figura 14.3 apresenta o coeficiente  $\beta$  medido e estimado pela Equação 5.7, considerando os modelos LAHE I e II, bem como os dados do presente trabalho, a exemplo da Figura 5.20. É evidenciada a maior diferença entre os valores previstos pela Equação 5.7 e os medidos na condição LAHE II – D<sub>10</sub>, embora também ocorram diferenças importantes em LAHE I – D<sub>1</sub>.

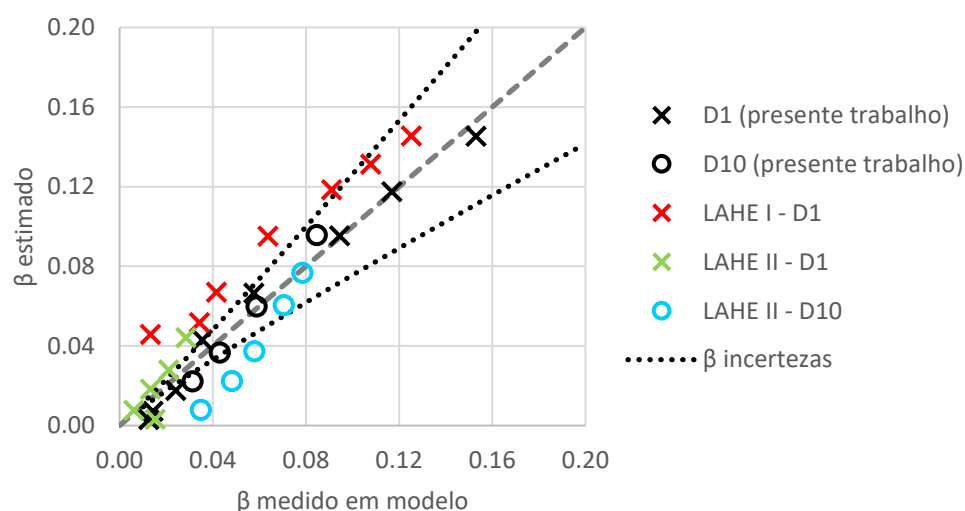


Figura 14.3 – Coeficiente  $\beta$  medido versus estimado pela Equação 5.7, dados do presente trabalho e dos modelos LAHE I e II.

Posto isto, conclui-se que a expressão para estimativa do coeficiente de entrada de ar  $\beta$  (Equação 5.7) pode ser utilizada em estruturas e modelos semelhantes aos aqui avaliados, resguardados os

limites de validade. Quando da aplicação em modelos físicos, a Equação 5.7 deve ser utilizada com cautela nos casos onde os efeitos de escala ou da subpressão sob o jato são significativos.

Como indicado no item 3.4.1, autores como Pinto et al. (1982) e Terrier (2016) sugerem equações de previsão de  $\beta$  em função de  $L_j/h_0$ . Como indicado na Figura 5.16 (item 5.3.2), a expressão proposta por Terrier (2016), função de  $L_j/h_0$ , é capaz de prever de forma aceitável o coeficiente  $\beta$  na condição  $D_1$ , contudo, o mesmo não é válido quando considerados os dados da condição  $D_{10}$ . Sendo assim, por fim, a Figura 14.4 exhibe  $\beta$  em função de  $L_j/h_0$ , considerando os dados das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ . Na referida figura constam, ainda, os ajustes propostos por Pinto et al. (1982) e Terrier (2016) – mencionados no item 3.4.1 e reapresentados, respectivamente, na Equação 14.1 e na Equação 14.2 – bem como equações lineares ajustadas considerando os dados do presente trabalho, em conjunto aos dados dos modelos LAHE I e LAHE II. Nesse caso, foram propostas equações de ajuste subdivididas para cada condição ( $D_1$  e  $D_{10}$ ), tendo resultado, respectivamente, na Equação 14.3 ( $R^2 = 0,97$ ;  $1 \leq L_j/h_0 \leq 23$ ) e Equação 14.4 ( $R^2 = 0,86$ ;  $1 \leq L_j/h_0 \leq 6$ ).

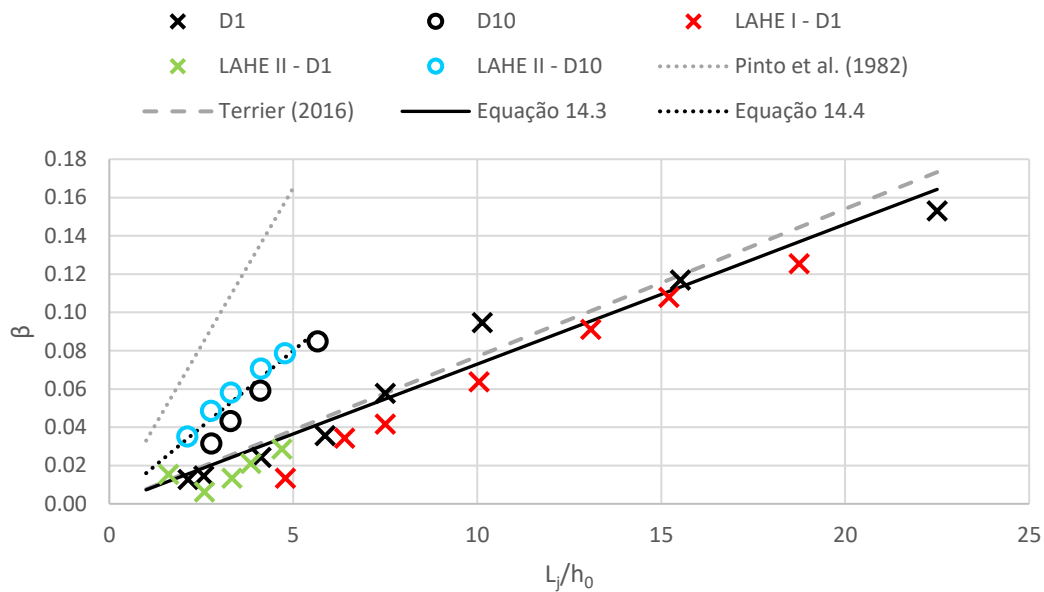


Figura 14.4 – Avaliação do coeficiente  $\beta$  em função da razão  $L_j/h_0$ .

$$\beta = 0,033 \frac{L_j}{h_0} \quad (\text{Pinto et al., 1982}) \quad \text{Equação 14.1}$$

$$\beta = 0,0077 \frac{L_j}{h_0} \quad (\text{Terrier, 2016}) \quad \text{Equação 14.2}$$

$$\beta = 0,0073 \frac{L_j}{h_0} \quad (\text{para os dados de } D_1) \quad \text{Equação 14.3}$$

$$\beta = 0,016 \frac{L_j}{h_0} \quad (\text{para os dados de } D_{10}) \quad \text{Equação 14.4}$$

Com base na Figura 14.4, é evidente o afastamento do ajuste de Pinto et al. (1982) frente aos dados avaliados, provavelmente em razão da não semelhança entre os casos – Pinto et al. (1982) consideraram sistema aerador em calha lisa, com  $\alpha \approx 16^\circ$ . O coeficiente de declividade da Equação 14.3 (igual a 0,0073) é muito próximo do valor da Equação 5.10 – de Terrier (2016), igual a 0,0077. Já na condição  $D_{10}$ , a declividade resultou igual a 0,016, ou seja, para a mesma razão  $L_j/h_0$ , o coeficiente  $\beta$  na condição  $D_{10}$  supera o da condição  $D_1$ , como esperado.

### 14.3 PRESSÕES SOBRE OS DEGRAUS

Aqui, o modelo de previsão de pressões proposto no item 5.5 é confrontado com resultados provenientes de ensaios no modelo LAHE II. O modelo LAHE I não foi utilizado na verificação dos resultados de pressão uma vez que, em razão do reduzido número de degraus desse modelo (total de 20 degraus), a extensão de calha a jusante do impacto do jato foi muito limitada, inviabilizando a aplicação da metodologia para previsão de pressões.

Os dados do LAHE II consideram um sistema aerador semelhante ao utilizado no modelo do presente trabalho, instalado no primeiro degrau da calha ( $D_1$ ). Mais detalhes constam na referência Ferla et al. (2022), que avalia os resultados de pressões mínimas extremas ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$ ,  $P_{5\%}$ ), nas faces verticais dos degraus dessa estrutura. A metodologia para medição das pressões no modelo LAHE II foi semelhante à utilizada no presente trabalho: por meio de transdutores de pressão (*Zurich PSI 420* e *Hytronic TM01*) instalados no eixo do canal, nas proximidades da aresta externa dos degraus. Foram adquiridos dados de pressão ao longo de 10 minutos, a uma frequência de aquisição de 100 Hz.

A Figura 14.5 apresenta os dados experimentais obtidos no modelo LAHE II (na face vertical dos degraus), em termos de pressões adimensionalizadas, tendo sido considerados os parâmetros sugeridos no modelo de previsão proposto no item 5.5, isto é, a Equação 5.9 no eixo das ordenadas e a Equação 5.10 no eixo das abscissas. Nesse caso, estão sendo considerados apenas os dados enquadrados na mesma faixa de vazões específicas  $q$  de protótipo que as do modelo do presente trabalho (isto é, da ordem de 11 a 29  $m^2/s$ , considerando a escala geométrica 1:15). Na Figura 14.5 também está representado o resultado obtido com a equação de previsão de pressões (proposta no item 5.5) – isto é, pela Equação 5.11, com coeficientes indicados na Tabela 5.7 (considerando os ajuste que levam em conta tanto os dados das condições  $D_1$  e  $D_{10}$  em conjunto, quanto os dados da condição  $D_1$  apenas, como indicado na legenda).

Pela Figura 14.5 é possível apontar que os dados adimensionalizados do modelo LAHE II são bem representados pela Equação 5.11, na média. Dentre os ajustes associados à Equação 5.11, observa-se que o com coeficientes da condição  $D_1$ , apenas, parece mais apropriado, representando melhor, na média, os dados associados ao modelo LAHE II (o que é razoável, visto que estão sendo avaliados os dados associados à condição  $D_1$  no modelo LAHE II). Contudo, para

$L' < 5$ , aproximadamente, há variação importante entre os resultados. A distância do parâmetro  $\Omega$  entre a linha da Equação 5.11 ( $D_1$ ) e os dados do LAHE II representa, nas pressões, diferenças máximas da ordem de 30%.

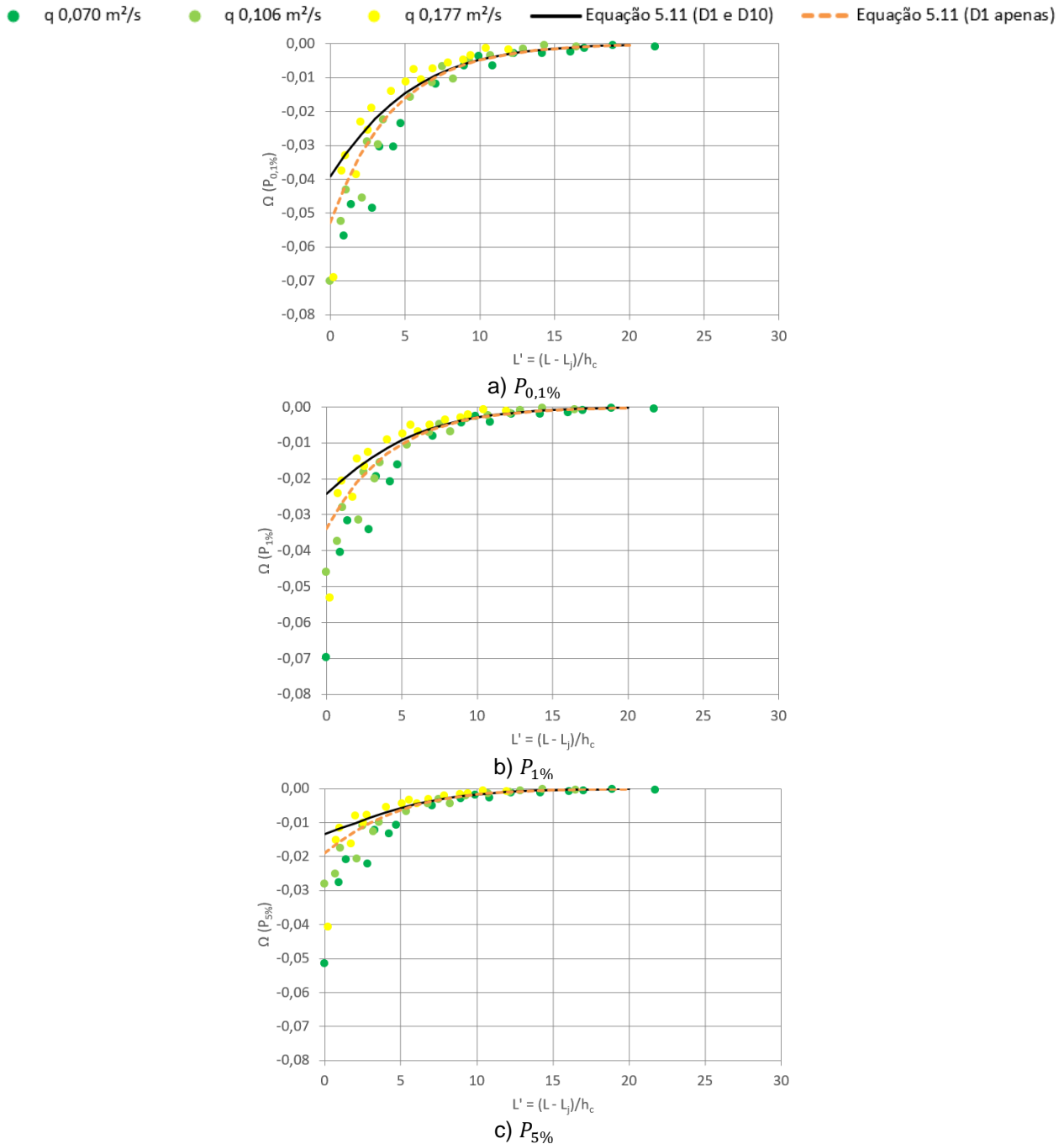


Figura 14.5 – Pressões extremas ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ) na face vertical dos degraus no modelo LAHE II: valores adimensionalizados, faixa de vazões restrita a  $0,070\ m^2/s \leq q \leq 0,177\ m^2/s$ .

Com base na Figura 14.5 conclui-se que o parâmetro adimensional proposto (Equação 5.9), bem como o ajuste sugerido na previsão de pressões (Equação 5.11, no caso da face vertical dos degraus) são representativos quanto ao fenômeno avaliado, podendo ser utilizados para previsão de pressões sobre os degraus em escoamentos com aeração induzida, desde que respeitados os limites de validade das equações. Face aos resultados obtidos, sugere-se cautela na utilização

dos ajustes em zonas próximas do ponto de impacto do jato sobre a calha (onde  $L' < 5$ , aproximadamente) uma vez que, nessa região, o ajuste proposto é mais dependente da vazão do escoamento.

## 15 APÊNDICE G

### PARÂMETROS QUE EXERCEM INFLUÊNCIA NO COEFICIENTE $\beta$

O item 5.3 apresenta a avaliação do coeficiente de entrada de ar  $\beta$  contemplando, ainda, a proposta de equação de previsão para este parâmetro. Este apêndice apresenta graficamente as relações existentes entre as principais características geométricas e hidráulicas que influenciam o coeficiente  $\beta$ , sendo eles:

- i. Número de Froude do escoamento na entrada do defletor ( $Fr_0$ );
- ii. Razão entre a altura do defletor  $t$  e a profundidade do escoamento a montante do defletor  $h_0$  ( $t/h_0$ );
- iii. Razão entre a energia cinética do escoamento e a energia de posição do defletor  $Z_0$  ( $\frac{V_0^2}{2g}/Z_0$ );
- iv. Razão entre a altura do degrau  $h_d$  e a profundidade  $h_0$  ( $h_d/h_0$ ).

A Figura 15.1 apresenta graficamente a relação direta entre cada um dos referidos parâmetros e o coeficiente  $\beta$ , considerando os dados obtidos nas condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub> do presente trabalho.

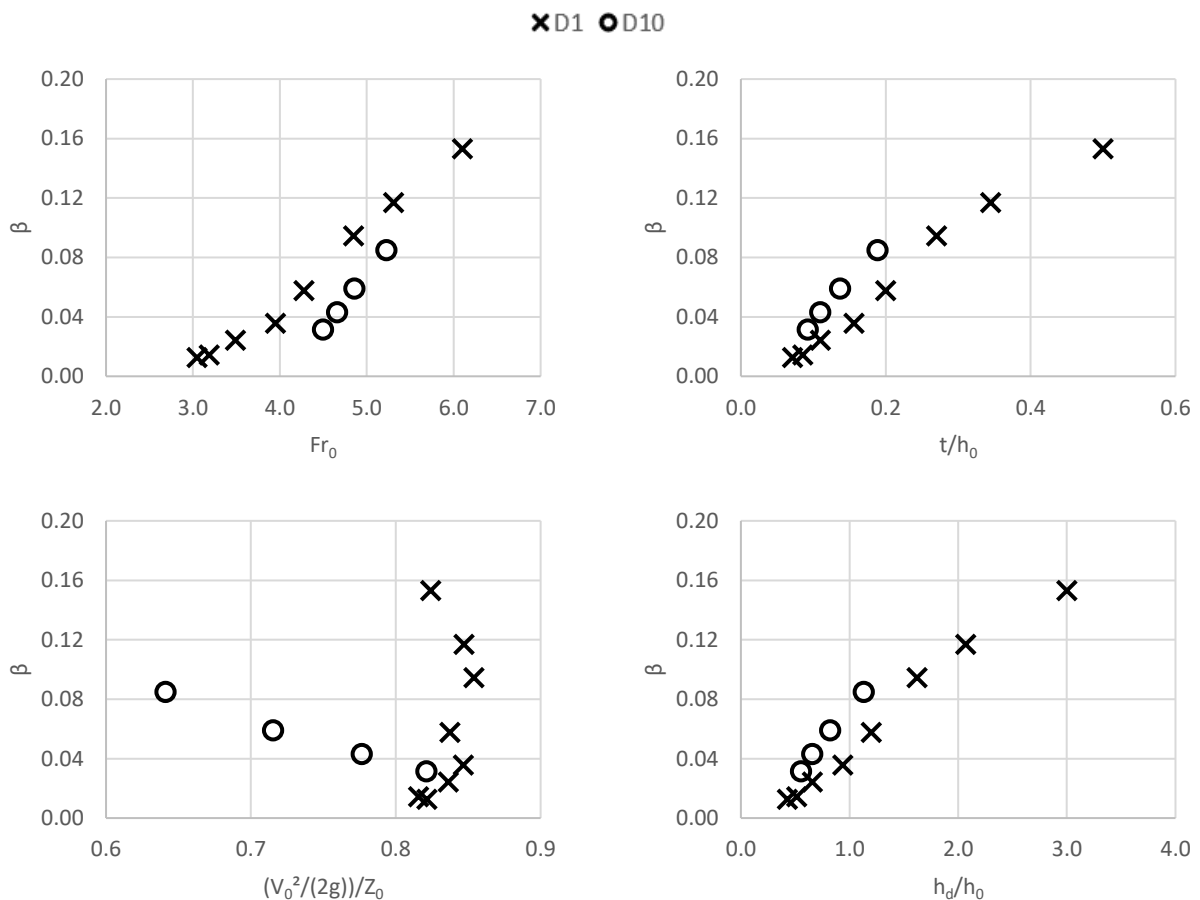


Figura 15.1 – Influência de parâmetros geométricos e hidráulicos no coeficiente  $\beta$ .

Terrier (2016) sugere, ainda, que o coeficiente  $\beta$  tem relação com os ângulos de inclinação da calha  $\alpha$  e do defletor  $\theta$ , porém, uma vez que esses parâmetros são constantes nos dados adquiridos neste trabalho, não foram contemplados na análise.

A equação de previsão do coeficiente  $\beta$  sugerida neste trabalho (Equação 5.7, item 5.3.3) não contempla a razão  $h_d/h_0$  em sua formulação. De fato, a análise envolvendo esta relação não resultou em melhorias no comportamento dos dados frente ao coeficiente  $\beta$  medido, como sugere a Figura 15.2. Neste caso, o parâmetro  $\zeta$  foi definido pela Equação 15.1, estando inseridos na Figura 15.2 tanto os dados das condições D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, como também resultados associados aos modelos LAHE I e LAHE II, para visualização geral do comportamento.

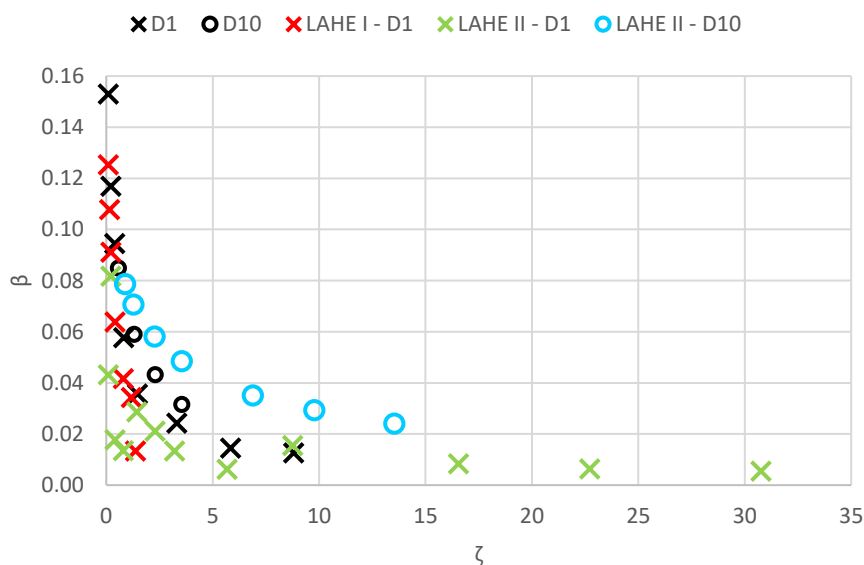


Figura 15.2 – Coeficiente de entrada de ar  $\beta$  como função de  $\zeta$ .

$$\zeta = \frac{V_0^2}{2g Z_0} \frac{1}{Fr_0} \frac{h_0}{t} \frac{h_0}{h_d} \quad \text{Equação 15.1}$$

Vale destacar que Terrier (2016) também identificou o mesmo comportamento: considerando a razão  $h_d/h_0$  na formulação de equação de previsão do coeficiente  $\beta$ , não se observou melhora significativa na relação entre os dados.

## 16 APÊNDICE H

### PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DAS PRESSÕES NAS CONDIÇÕES NAT, D<sub>1</sub> E D<sub>10</sub>

Neste item constam os resultados das medições dos parâmetros estatísticos das pressões nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>.

Da Figura 16.1 até a Figura 16.2 constam, respectivamente, os resultados de  $P_{med}$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$  (representados em unidades de altura piezométrica, em m), nas faces vertical e horizontal dos degraus. Nas referidas figuras, o degrau de início da aeração natural (incipiente), definido por meio de análise visual do escoamento, como disposto nos Capítulos 4 e 5, também está representado – “Aeração incipiente (NAT)”, como indica a legenda. São apresentados os dados para as vazões específicas  $q$  de 0,20 até 0,50 m<sup>2</sup>/s, como indicado na Tabela 16.1, que também expõe demais características principais associadas às condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>.

Tabela 16.1 – Compilado de características principais das condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub> (considerando a faixa  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ).

Condição	$q \text{ (m}^2/\text{s)}$	Coeficiente $\beta$	Nº do degrau onde ocorre a/o			
			aeração incipiente	aeração total	impacto do jato	final da <i>blackwater</i>
NAT	0,20	-	11	18	-	-
	0,30	-	18	26	-	-
	0,40	-	23	34	-	-
	0,50	-	28	40	-	-
D <sub>1</sub>	0,20	3,6%	-	-	6	10
	0,30	2,4%	-	-	6	13
	0,40	1,4%	-	-	5	16
	0,50	1,3%	-	-	5	19
D <sub>10</sub>	0,20	8,5%	-	-	14	12
	0,30	5,9%	-	-	14	13
	0,40	4,3%	-	-	14	15
	0,50	3,1%	-	-	14	17

De acordo com as referidas figuras, pode-se destacar que:

- i. O escoamento na configuração D<sub>10</sub> apresenta dois trechos com comportamentos distintos na calha: um deles, a montante do degrau nº10, que está sujeito à ação da aeração natural, e outro, a jusante do degrau nº10, sujeito à ação do sistema aerador. Reitera-se que, a montante do degrau nº10, os resultados da configuração D<sub>10</sub> foram considerados iguais aos resultados da condição NAT, conforme indicado no APÊNDICE D);
- ii. Para todos os parâmetros estatísticos analisados, as condições de aeração induzida (D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>) apresentam valores medidos próximos de zero na região de lançamento do jato, o que já era esperado. Assim que entra em contato com o defletor, o escoamento



é lançado sobre os degraus, desse modo, nessa região, é razoável que os valores de pressão medidos sejam próximos de zero (isto é, identifica-se a ocorrência de pressão atmosférica);

- iii. Na condição  $D_1$ , o ponto de impacto do jato é representado por um pico expressivo nos valores de  $P_{med}$ ,  $P_\sigma$  e  $P_{99,9\%}$ , principalmente, na face horizontal dos degraus. Esse pico não é observado na condição  $D_{10}$ . Essa distinção pode ser explicada devido às diferenças identificadas visualmente no aspecto do jato das condições  $D_1$  e  $D_{10}$  (como explorado no item 5.2, na Figura 5.6): enquanto na condição  $D_1$  o jato é íntegro e formado quase que exclusivamente por água, na condição  $D_{10}$  o jato tem aspecto “fragmentado”, sendo formado principalmente pela mistura ar-água;
- iv. Os valores de  $P_{med}$  nas configurações  $D_1$  e  $D_{10}$  são semelhantes aos da configuração NAT, com exceção do local de lançamento e impacto do jato. As faces horizontais estão sujeitas a maiores valores de pressão do que as faces verticais, em conformidade com o observado por Sánchez-Juny et al. (2007, 2008), entre outros, que consideraram escoamentos sujeitos apenas à aeração natural;
- v. Como já destacado, os resultados sugerem que os valores de  $P_{med}$  nas configurações  $D_1$  e  $D_{10}$  são semelhantes aos da configuração NAT, o que, de certa forma, contraria o esperado se levadas em conta as conclusões de Peterka (1953) e Dong e Su (2006). Esses autores identificaram que, com o aumento da concentração de ar no escoamento, houve também o aumento nas pressões médias (ver item 3.3). Assim, poderia se supor que as condições  $D_1$  e  $D_{10}$  resultariam em pressões médias superiores às da condição NAT (visto que as primeiras são caracterizadas por maior incremento de ar do que a segunda). Contudo, não foi o observado. Tais resultados concordam com as conclusões já obtidas por Novakoski (2021), bem como com as análises prévias apresentadas no APÊNDICE A;
- vi. Considerando os resultados apresentados nas faces horizontais dos degraus, os valores de  $P_\sigma$  também são, de modo geral, semelhantes entre todas as condições analisadas, com exceção do local de lançamento e proximidades do impacto do jato. O mesmo pode ser dito para o comportamento dos parâmetros extremos ( $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$ );
- vii. Para o caso das faces verticais, os parâmetros estatísticos  $P_\sigma$ ,  $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$  na condição  $D_{10}$  apresentaram comportamento distinto das outras duas condições: há uma evidente região de transição, após o impacto do jato nos degraus, até que os resultados da condição  $D_{10}$  alcancem o comportamento apresentado pelos resultados das outras duas condições (NAT e  $D_1$ ). É possível que isso esteja ocorrendo em razão do aspecto visual do escoamento: na condição  $D_{10}$  há uma mistura homogênea entre ar e água desde o ponto de impacto do jato, enquanto nas condições NAT e  $D_1$  não (conforme abordado no item 5.2);

- viii. Conforme Figura 16.4, o valor máximo de  $P_{99,9\%}$  (que foi identificado na face horizontal dos degraus, como esperado) é da ordem de 2 m (em escala de modelo físico). Se considerado o resultado associado a um protótipo, a magnitude do valor resultante seria entre 20 m e 40 m (considerando, respectivamente, as escalas geométricas 1:10 e 1:20, entre modelo e protótipo). Tais valores são significativamente inferiores à resistência à compressão de concretos usualmente empregados em vertedouros (de modo geral, da ordem de 15 MPa a 30 MPa);
- ix. Já no caso da Figura 16.3, o valor mínimo de  $P_{0,1\%}$  (por sua vez, identificado na face vertical dos degraus) é da ordem de -1 m (em modelo físico). Quando transferido para a escala de protótipo, este resultado está associado a valores de pressões entre -10 m e -20 m (considerando também as escalas geométricas 1:10 e 1:20), isto é, valores indicativos da provável ocorrência de cavitação no escoamento.

Por fim, a Figura 16.5 apresenta os resultados de  $P_{med}$ ,  $P_{\sigma}$ ,  $P_{0,1\%}$  e  $P_{99,9\%}$ , em função da posição  $L_{NAT} - L_i$  (no caso da condição NAT) e  $L - L_j$  (no caso das condições  $D_1$  e  $D_{10}$ ), ver Figura 4.3. Nas condições de aeração induzida, o ponto de impacto do jato ( $L_j$ ) pode ser entendido como equivalente à  $L_i$ , no que diz respeito à aeração – dado que nesse ponto já é possível identificar a aeração inferior do escoamento, como já mencionado no item 5.2. Já na aeração natural,  $L_i$  corresponde às proximidades do início de aeração incipiente no escoamento. Desse modo, considerando a Figura 16.5, os pontos posicionados à direita do valor zero no eixo das abscissas correspondem a situações em que o escoamento nas proximidades dos degraus não é aerado, isto é, é monofásico, composto por água. Considerando a Figura 16.5 pode-se destacar que:

- i. Os valores absolutos dos parâmetros estatísticos analisados crescem com o aumento da vazão;
- ii. De modo geral, a magnitude dos resultados dos parâmetros estatísticos é a mesma nas três condições (NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ ), como já indicado pelas figuras anteriormente introduzidas;
- iii. Na condição NAT, para todas as vazões ensaiadas, boa parte da extensão da calha está sujeita a escoamento sem aeração, isto é, que ainda não atingiu o início da aeração natural (pontos localizados à direita do valor zero, no eixo das abscissas). O contrário é observado nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ : nesses casos, a maior parte dos dados está posicionado à esquerda de zero, no eixo das abscissas, indicando que o escoamento já é aerado.



Figura 16.1 – Parâmetro  $P_{med}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

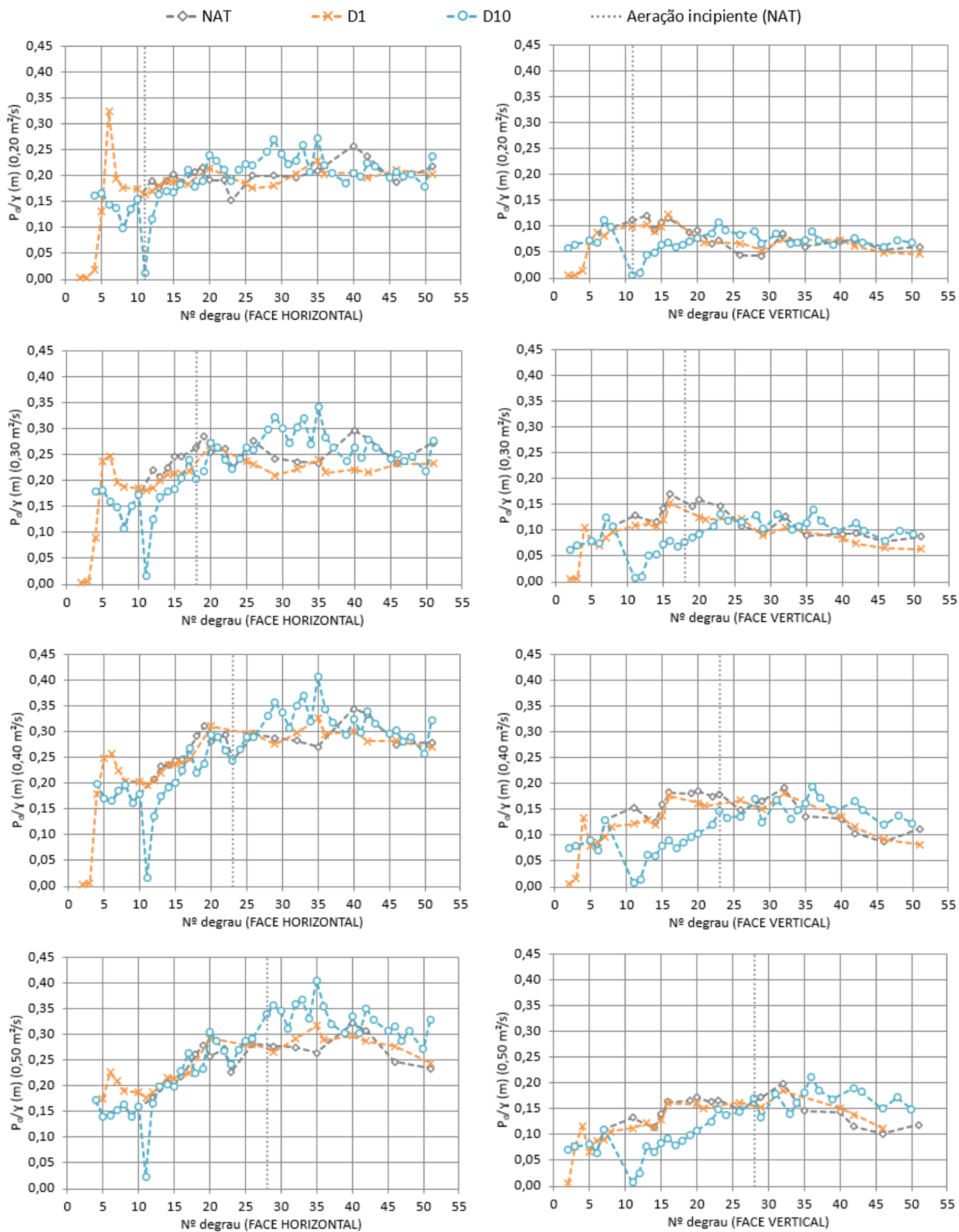


Figura 16.2 – Parâmetro  $P_{\sigma}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, D1 e D10, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.



Figura 16.3 – Parâmetro  $P_{0,1\%}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

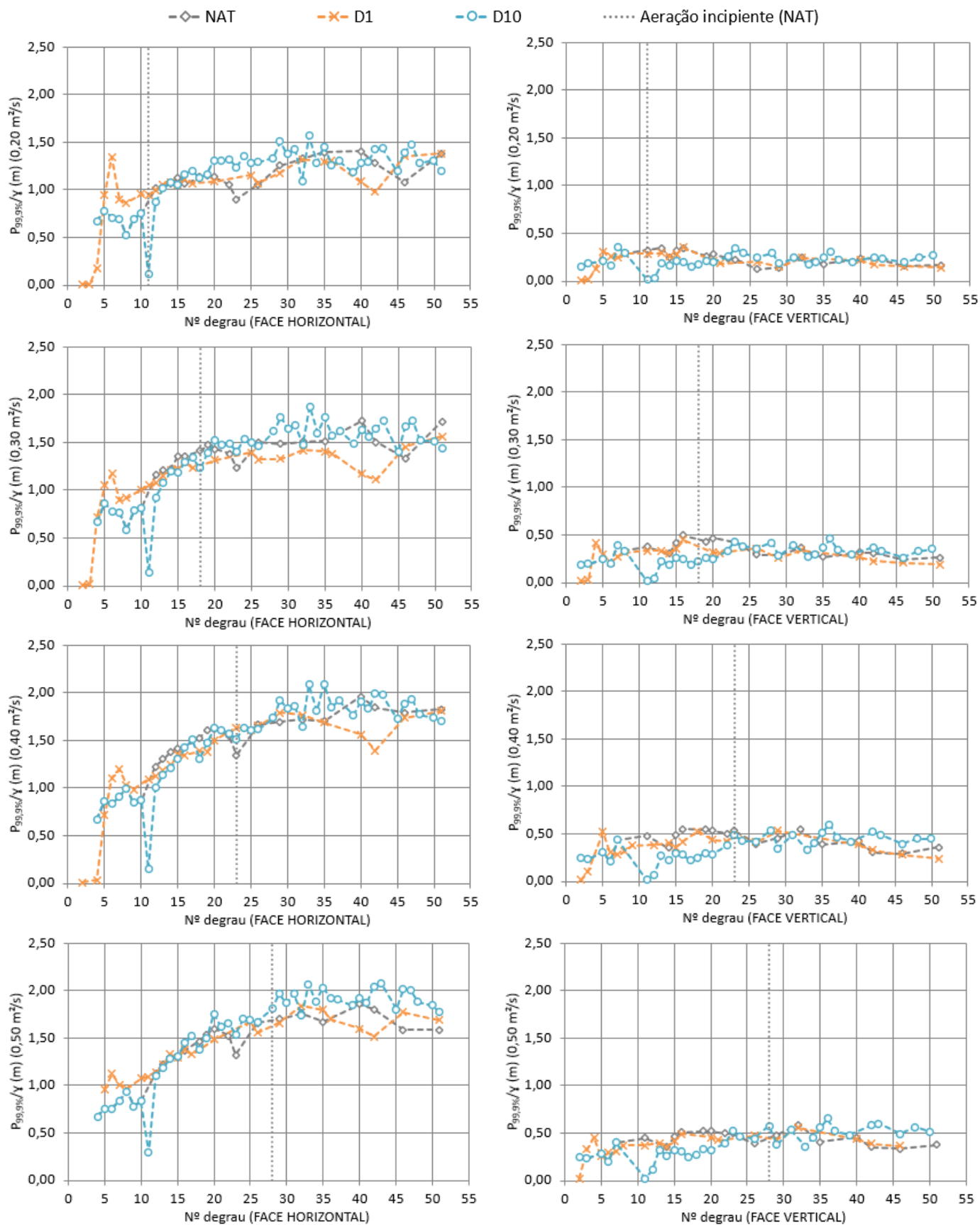


Figura 16.4 – Parâmetro  $P_{99,9\%}/\gamma$  (representado em unidade de altura piezométrica, em m), ao longo dos degraus, para as condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  (de modo que cada linha de gráficos apresenta os resultados associados a uma mesma vazão  $q$ , como indicado). Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

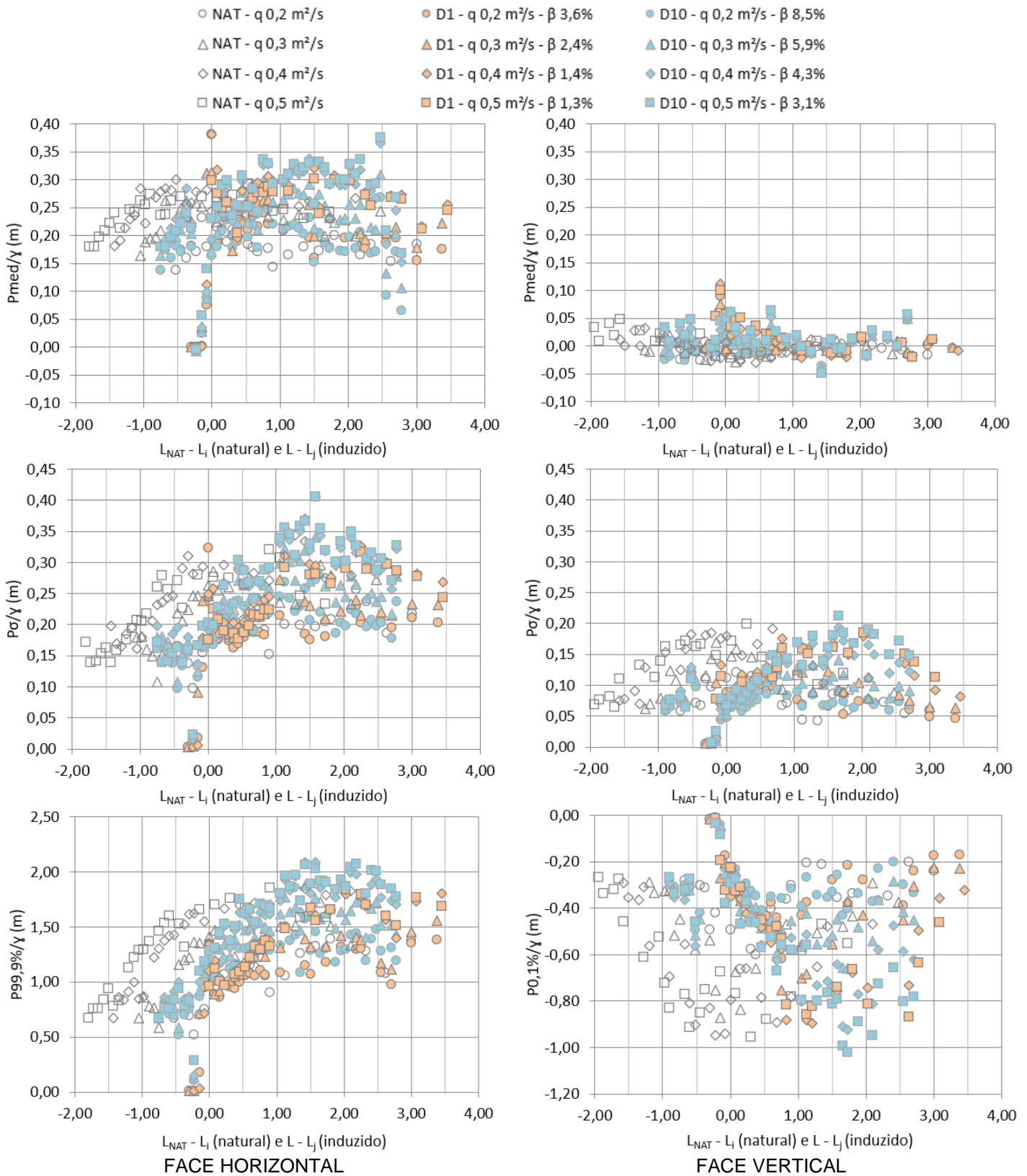


Figura 16.5 – Parâmetro estatísticos das pressões em função da posição  $L_{NAT} - L_i$  (na condição NAT) e  $L - L_j$  (nas condições D1 e D10), considerando  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Os resultados obtidos na face horizontal estão representados à esquerda e os na face vertical à direita.

## 17 APÊNDICE I

### COMPARAÇÃO ENTRE PRESSÕES MEDIDAS E ESTIMADAS

Aqui estão apresentadas as pressões medidas (em ensaio em modelo físico) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos no item 5.5), nas condições de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ). Os gráficos apresentam, no eixo das abscissas, o adimensional de posição  $L' = \frac{L-L_j}{h_c}$  e, no eixo das ordenadas, a altura de pressão em termos de coluna piezométrica. Os dados estão representados considerando a escala de modelo. Os gráficos estão agrupados por parâmetro estatístico avaliado ( $P_{med}$ ,  $P_\sigma$ ,  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$ ,  $P_{5\%}$ ,  $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ) e por condição ( $D_1$  ou  $D_{10}$ ). Além disso, também estão agrupados de acordo com a face do degrau analisada, da seguinte forma:

- i. Face vertical dos degraus: Figura 17.3 até Figura 17.7 (em ordem,  $P_{med}$ ,  $P_\sigma$ ,  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ );
- ii. Face horizontal dos degraus: Figura 17.8 até Figura 17.12 (em ordem,  $P_{med}$ ,  $P_\sigma$ ,  $P_{95\%}$ ,  $P_{99\%}$  e  $P_{99,9\%}$ ).

No caso dos resultados obtidos nas faces verticais (Figura 17.3 a Figura 17.7), pode-se destacar:

- i. Quando comparados com os dados medidos em laboratório, os modelos de previsão propostos se mostraram adequados na estimativa de pressões. De modo geral, independentemente do modelo de previsão adotado – isto é, usando a equação que considera os dados de  $D_1$  e  $D_{10}$  em conjunto, ou a equação de  $D_1$  e  $D_{10}$  de forma isolada – as pressões obtidas resultaram próximas das pressões medidas laboratório;
- ii. Em suma, as maiores diferenças percentuais entre os resultados das pressões previstas e medidas ocorrem em  $P_{med}$  (chegando a diferenças de mais de 100%), como exposto na Figura 17.3. Contudo, essa discrepância pode ser pouco relevante, especialmente quando considerada a magnitude dos valores desse parâmetro, uma vez que, na face vertical dos degraus, os valores de  $P_{med}$  são próximos de zero em grande parte da extensão da calha;
- iii. Na previsão de pressões mínimas extremas ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ), Figura 17.5 até Figura 17.7, as diferenças máximas entre os dados medidos e estimados foram da ordem de 50%. Em suma, os modelos de previsão conduzem a resultados favoráveis à segurança, com exceção de alguns pontos e trechos isolados;
- iv. Ainda com relação às pressões mínimas extremas ( $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ ), os valores mínimos obtidos com a aplicação dos modelos de previsão, independentemente da condição avaliada ( $D_1$  ou  $D_{10}$ ), são similares. Em exceção a essa regra estão os resultados associados à maior vazão ensaiada ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ). Nesse caso, quando avaliado o



parâmetro estatístico  $P_{0,1\%}$ , por exemplo, enquanto na condição  $D_1$  a aplicação dos modelos de previsão indica altura de pressão mínima da ordem de, aproximadamente, -1,00 m (para  $s' > 6$ ), na condição  $D_{10}$  os resultados mínimos atingem cerca de -0,80 m (para  $s' > 6$ ). À primeira vista, tais resultados podem parecer coerentes, uma vez que na condição  $D_{10}$  o escoamento que atinge a calha em degraus é composto por uma mistura ar-água mais homogênea e desenvolvida do que na condição  $D_1$ , o que ameniza as pressões na estrutura. Contudo, esse comportamento é válido apenas nas porções próximas ao impacto do jato (portanto, para  $s'$  próximo de zero). Sendo assim, é possível que o uso dos modelos de previsão propostos, quando aplicados em casos de vazões altas (compatíveis a  $q > 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$  em modelo) e para sistema aerador nas proximidades da crista do vertedouro (caso compatível à condição aqui denominada  $D_1$ ), pode resultar em valores excessivamente favoráveis à segurança. Tais resultados estão representados na Figura 17.5 e também na Figura 17.1, a seguir, para melhor visualização do comportamento abordado.

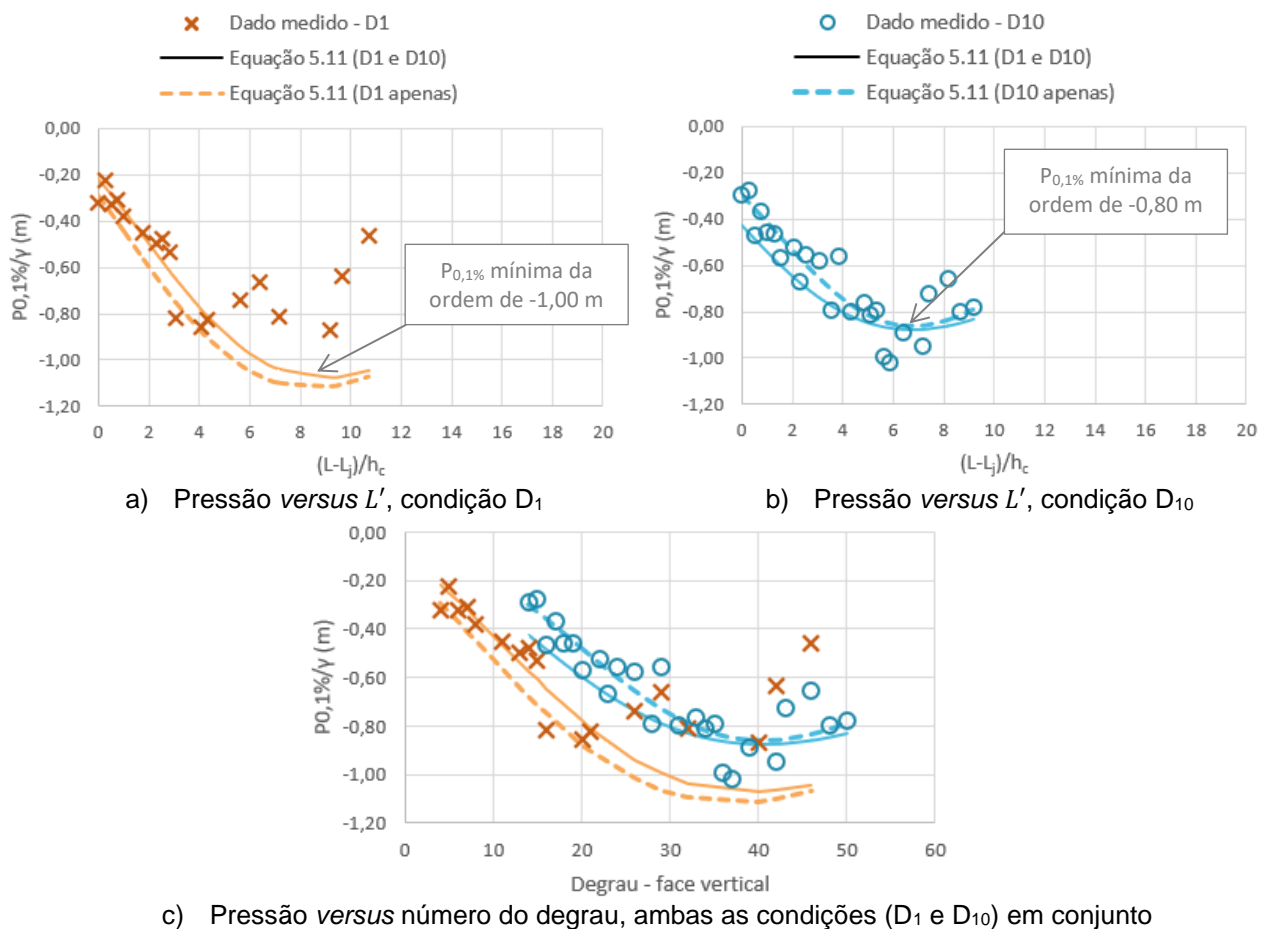


Figura 17.1 – Representação de  $P_{0,1\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos), para a vazão  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .

No caso dos resultados obtidos nas faces horizontais dos degraus (Figura 17.8 até Figura 17.12), pode-se destacar:

- i. Os modelos propostos se comportaram de forma adequada na previsão das pressões da condição  $D_{10}$ , independentemente da equação considerada (tanto o modelo unicamente desenvolvido com os dados de  $D_{10}$  quanto o desenvolvido para os dados de  $D_1$  e  $D_{10}$  em conjunto);
- ii. Já na condição  $D_1$ , a aplicação dos modelos de previsão leva a resultados excessivamente distintos – embora ainda favoráveis à segurança – quando comparados aos dados medidos, na situação de maior vazão ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ ) e quando  $L' > 6$ . Desse modo, especialmente nesses casos – isto é, vazões elevadas e posicionamento do sistema aerador nas proximidades da crista do vertedouro – recomenda-se uso com cautela dos modelos de previsão nas faces horizontais dos degraus. Esse comportamento pode ser observado da Figura 17.8 até a Figura 17.12, e também está destacado na Figura 17.2, a seguir.

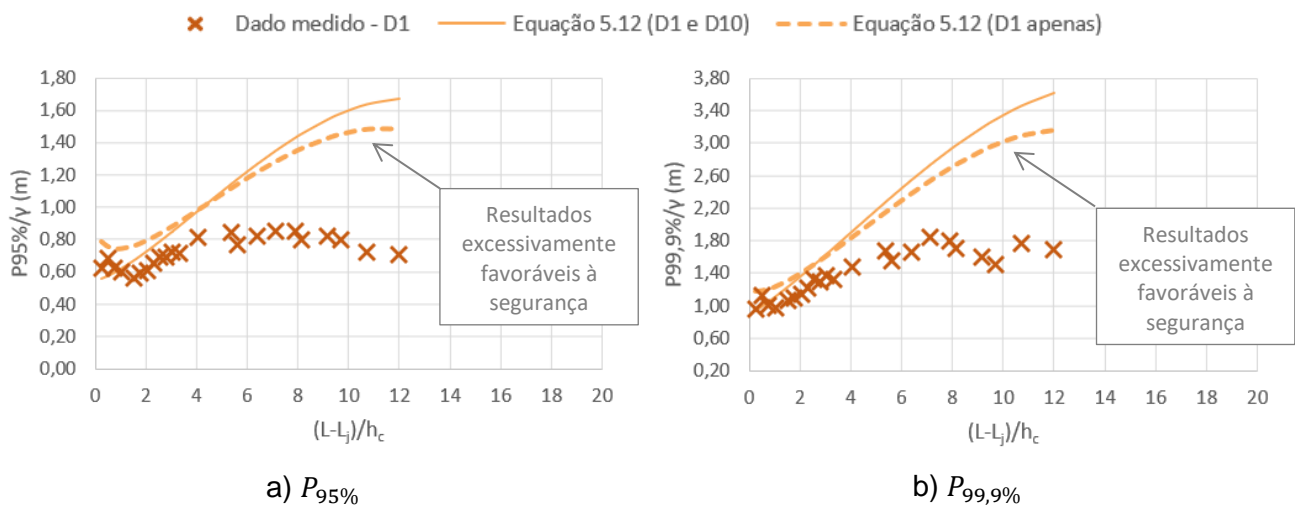
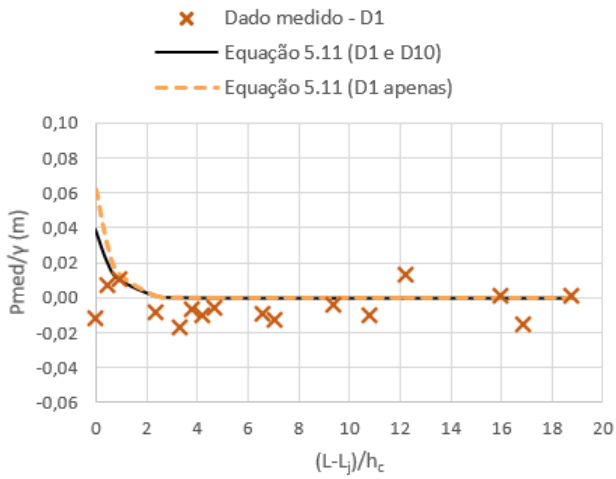
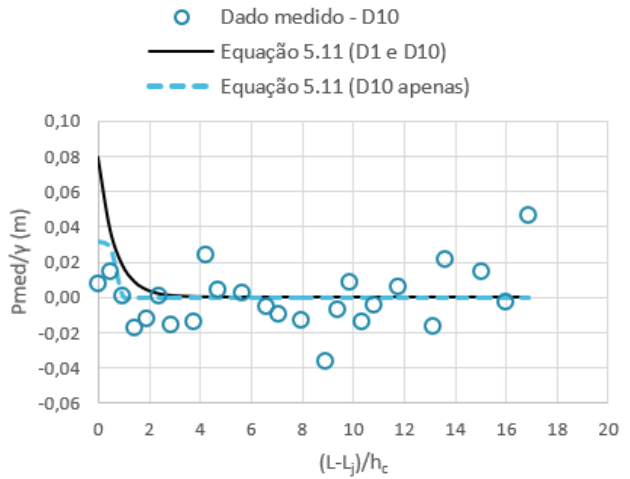


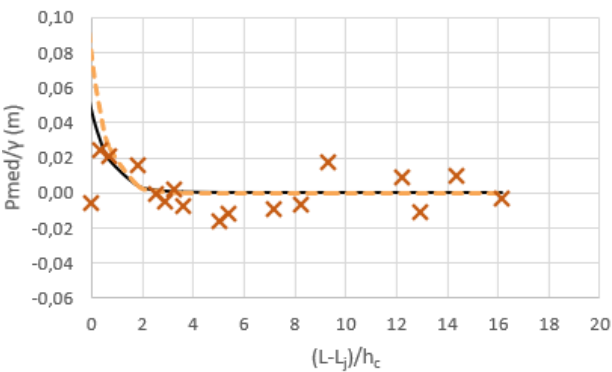
Figura 17.2 – Representação de resultados associados à condição  $D_1$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos), para a vazão  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ .



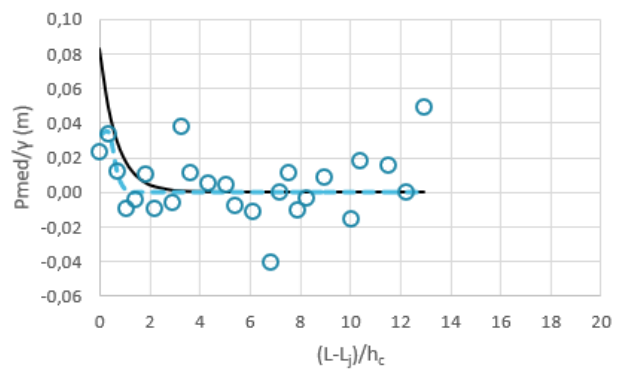
a)  $D_1 (q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s})$



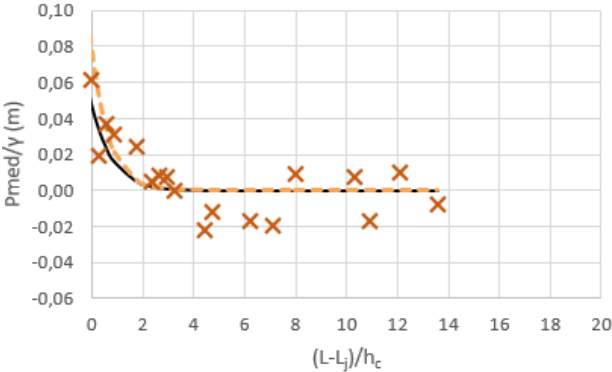
b)  $D_{10} (q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s})$



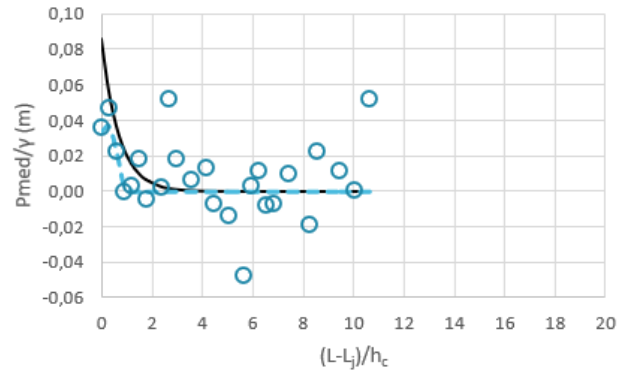
c)  $D_1 (q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s})$



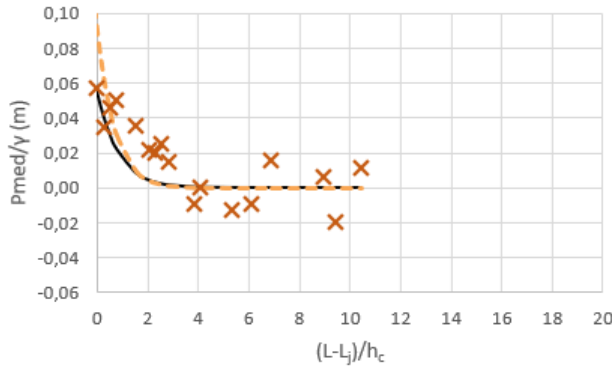
d)  $D_{10} (q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s})$



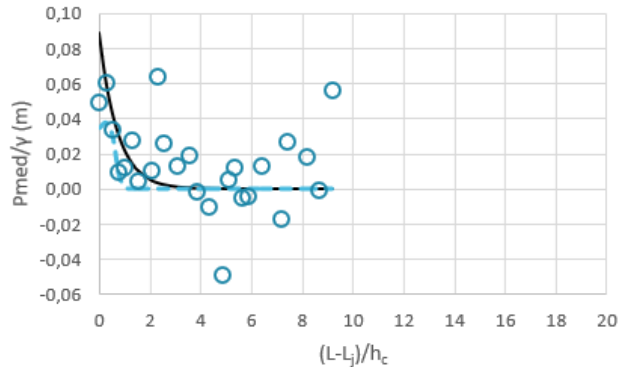
e)  $D_1 (q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s})$



f)  $D_{10} (q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s})$

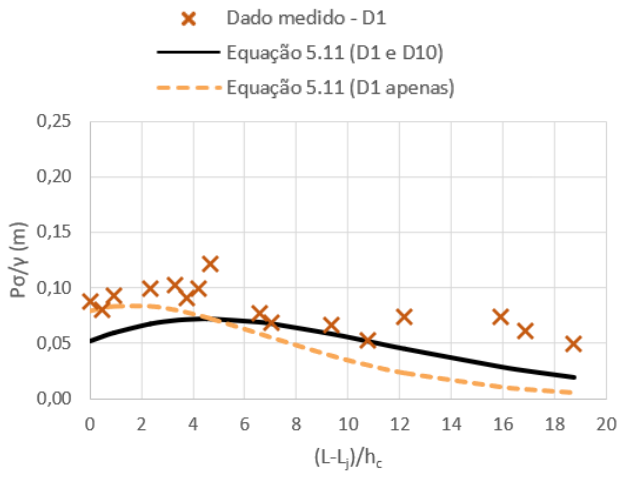


g)  $D_1 (q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s})$

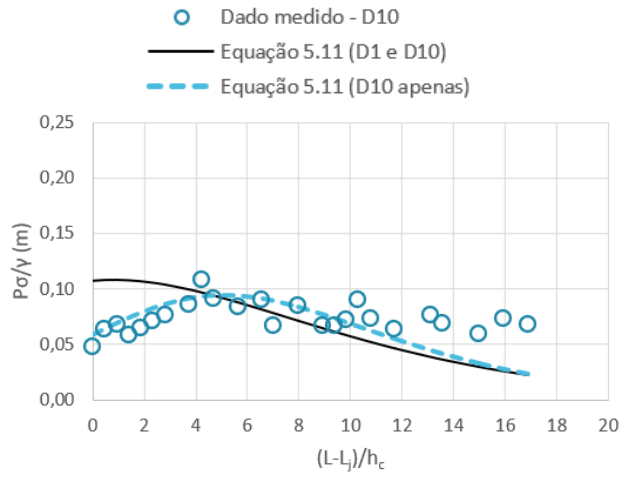


h)  $D_{10} (q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s})$

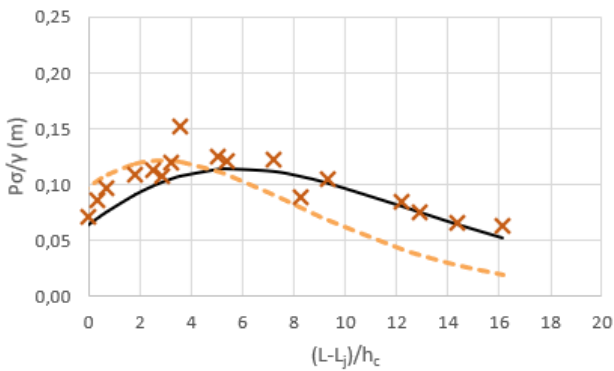
Figura 17.3 – Representação de  $P_{med}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).



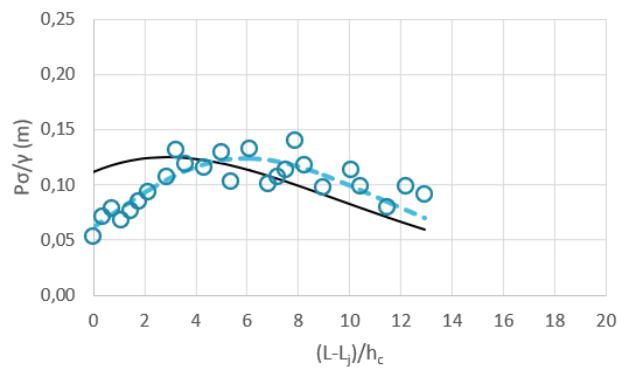
a)  $D_1$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )



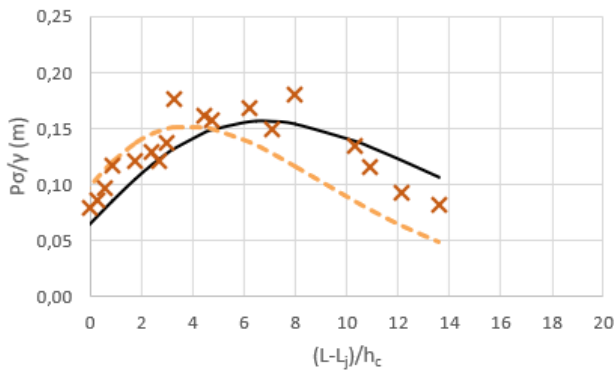
b)  $D_{10}$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )



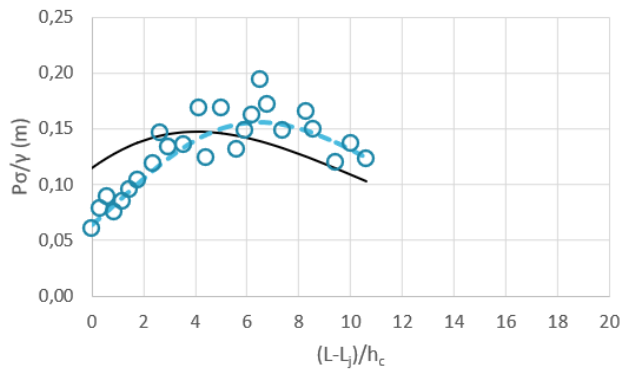
c)  $D_1$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )



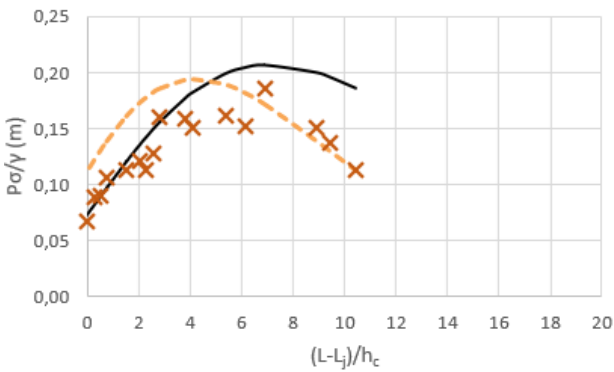
d)  $D_{10}$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )



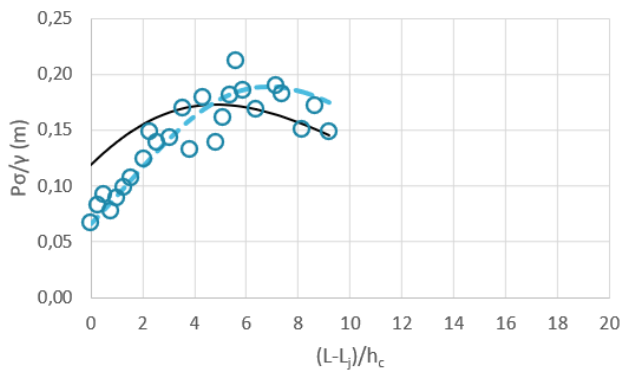
e)  $D_1$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )



f)  $D_{10}$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )



g)  $D_1$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )



h)  $D_{10}$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )

Figura 17.4 – Representação de  $P_\sigma$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).

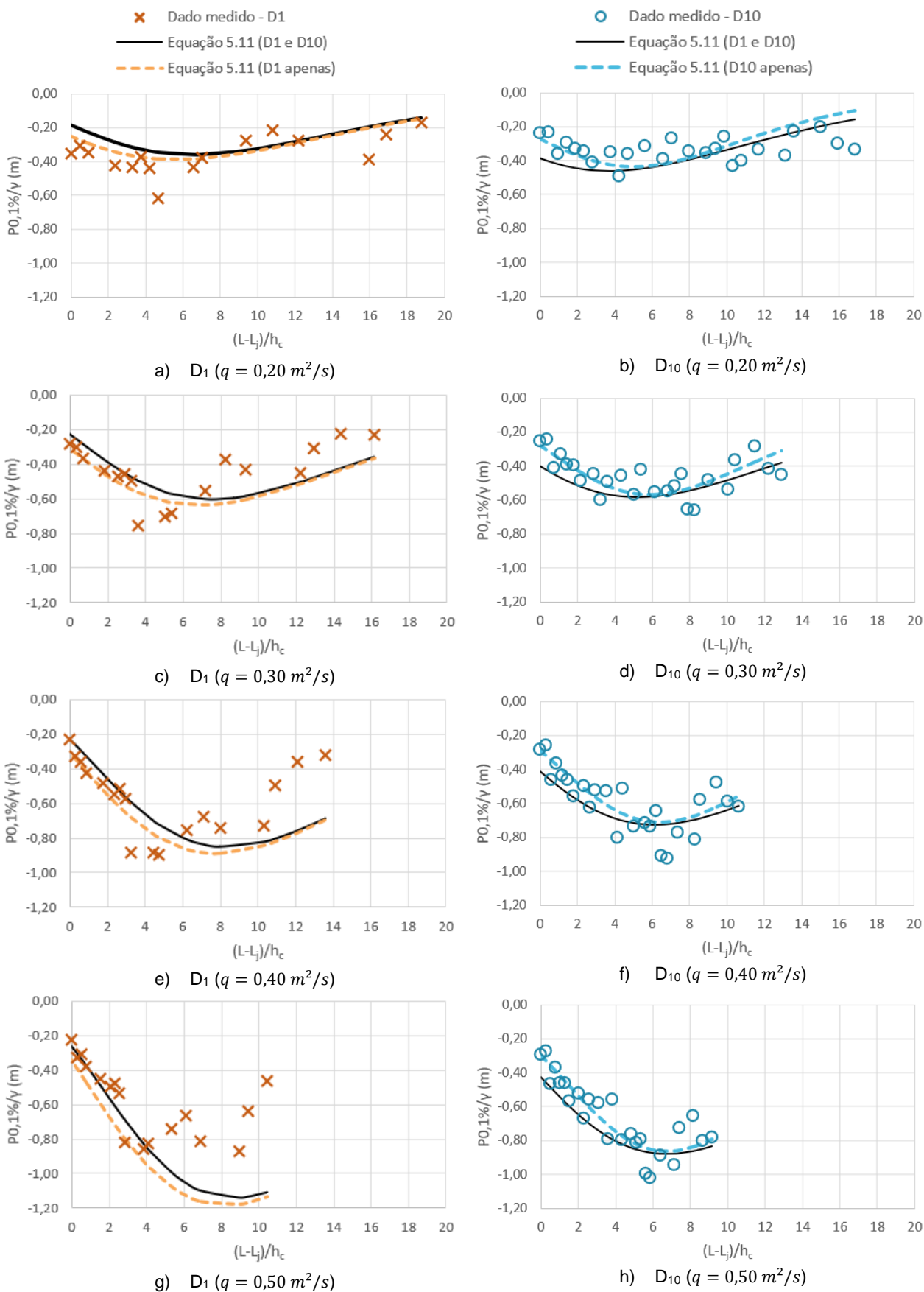


Figura 17.5 – Representação de  $P_{0,1\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).

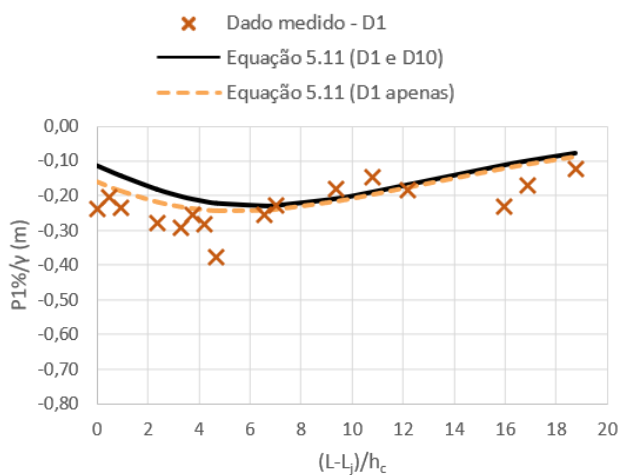
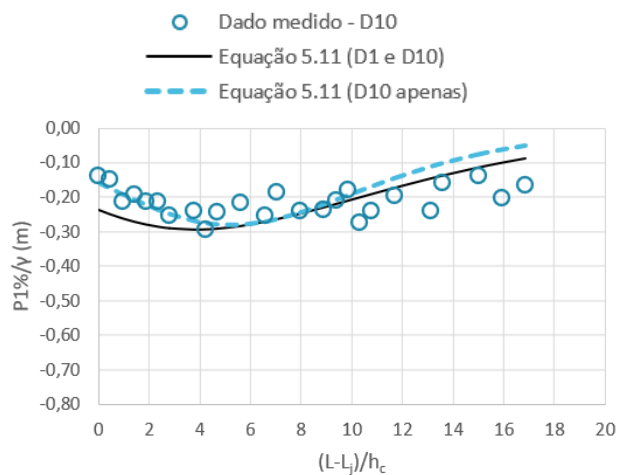
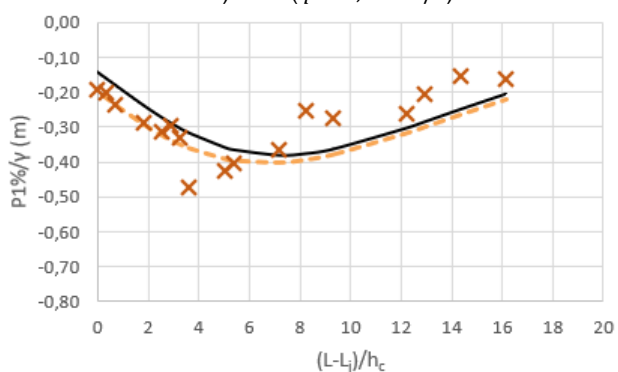
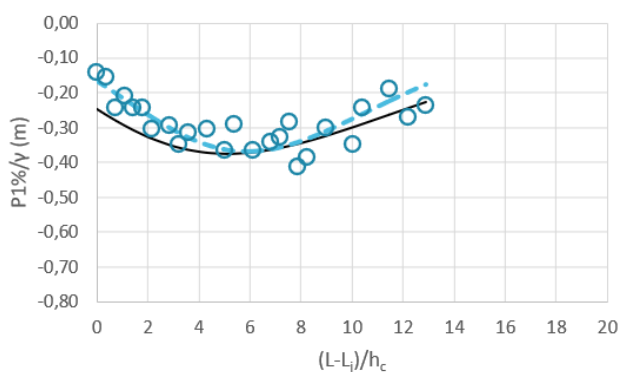
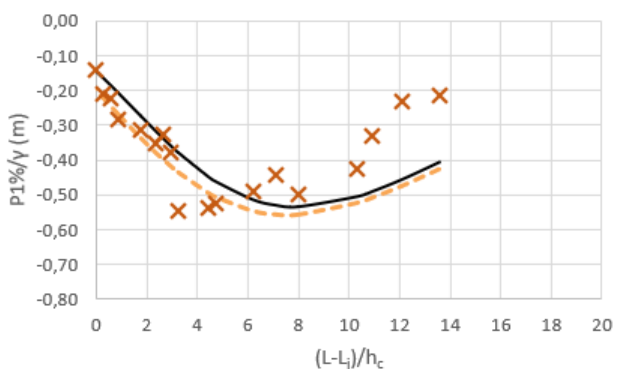
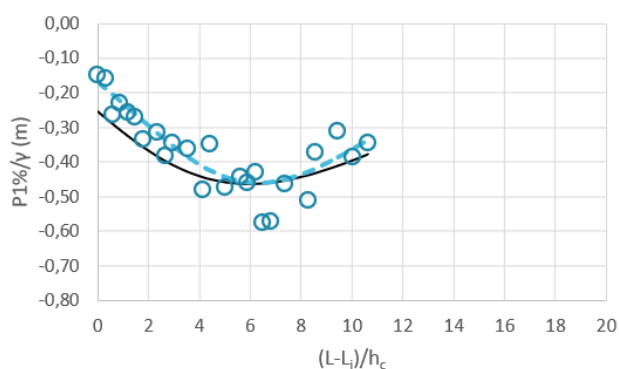
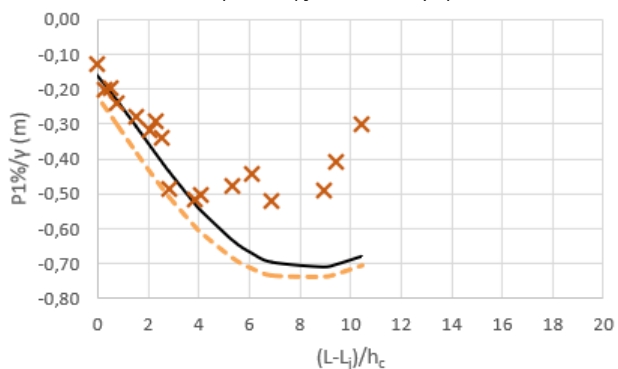
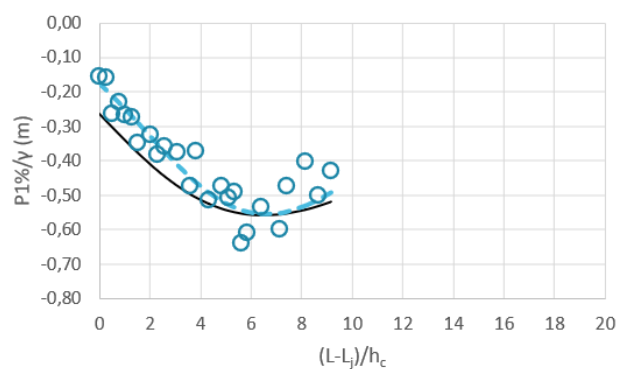
a)  $D_1$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )b)  $D_{10}$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )c)  $D_1$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )d)  $D_{10}$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )e)  $D_1$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )f)  $D_{10}$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )g)  $D_1$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )h)  $D_{10}$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )

Figura 17.6 – Representação de  $P_{1\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).

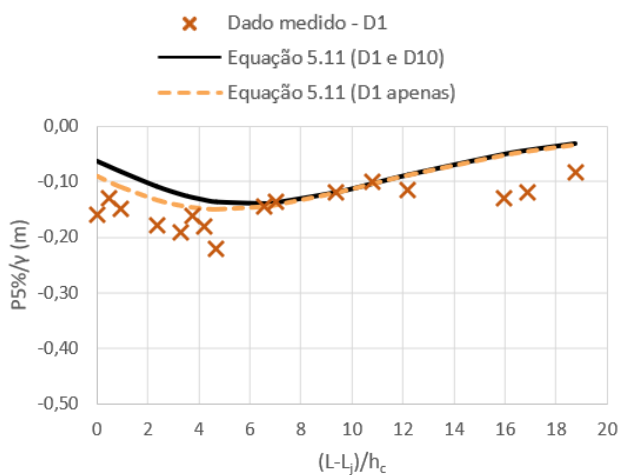
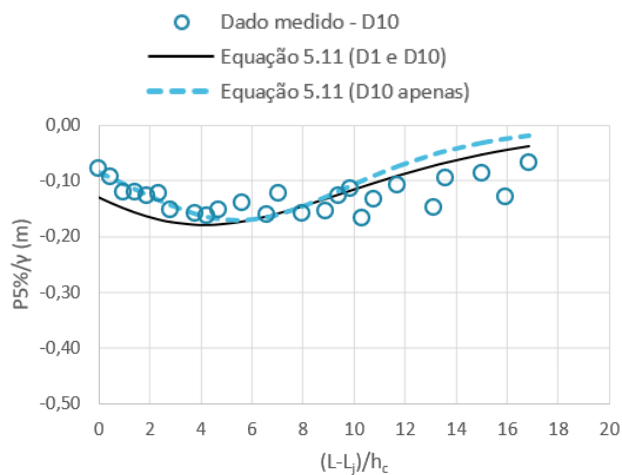
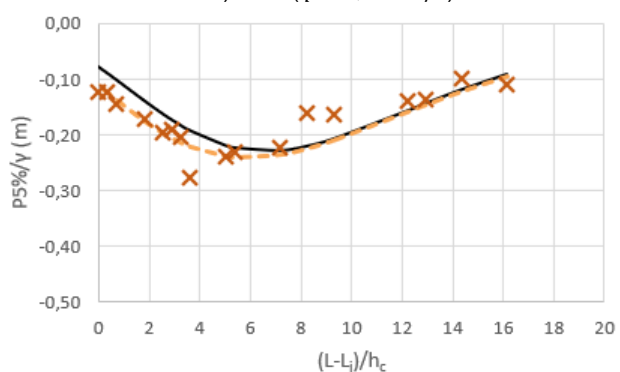
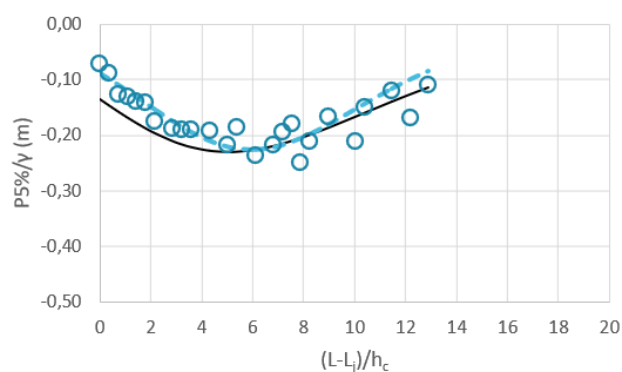
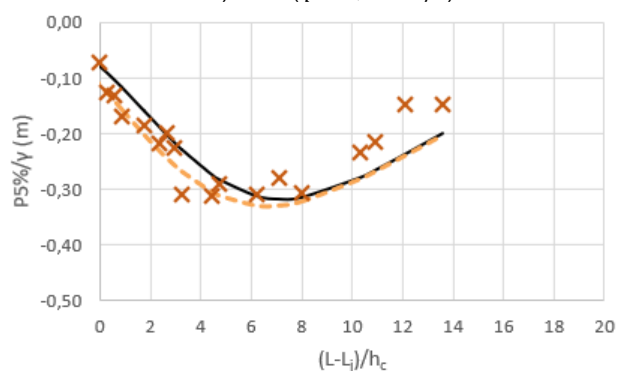
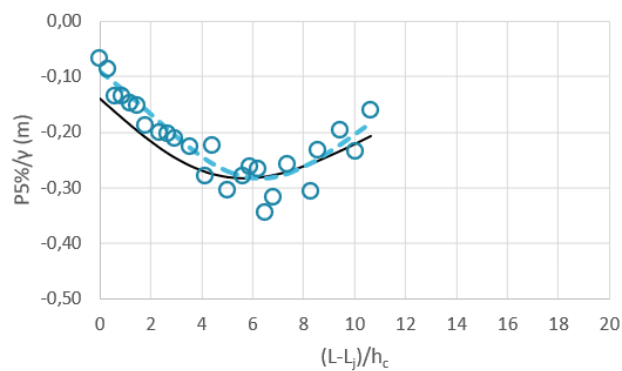
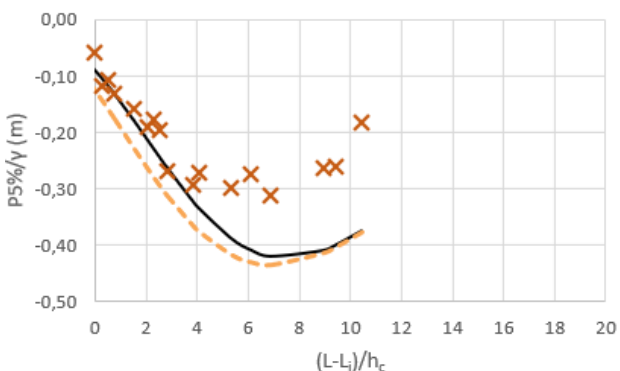
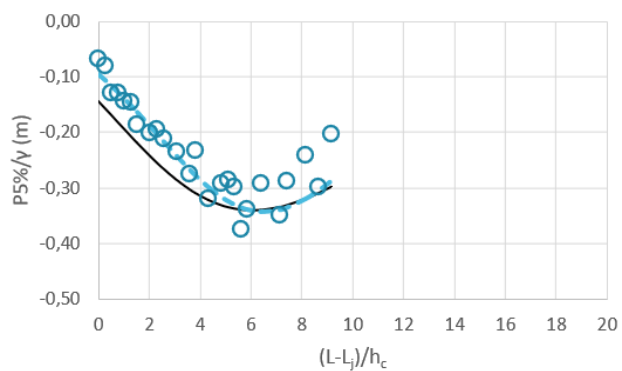
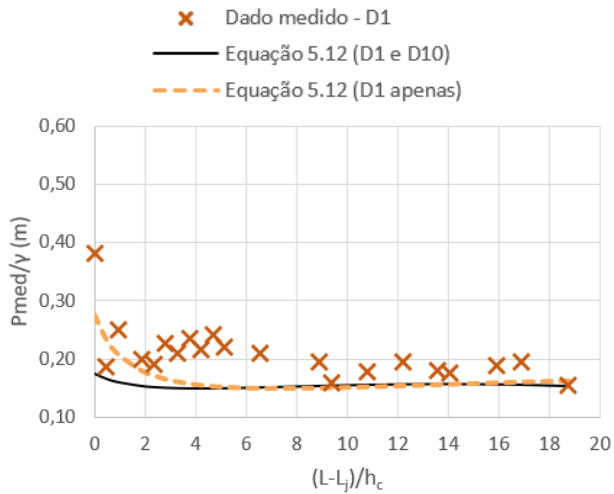
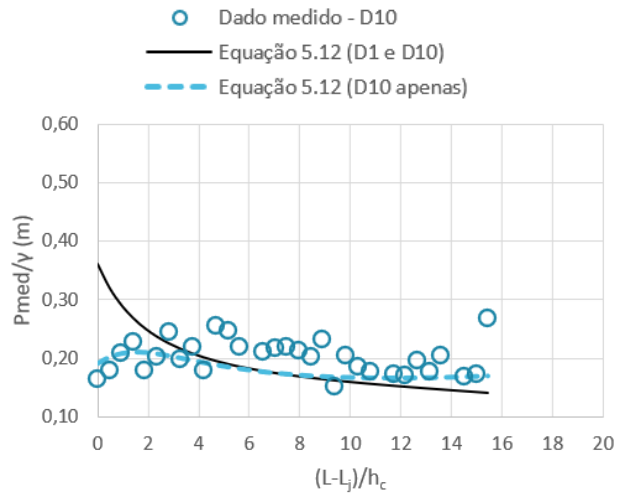
a)  $D_1$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )b)  $D_{10}$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )c)  $D_1$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )d)  $D_{10}$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )e)  $D_1$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )f)  $D_{10}$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )g)  $D_1$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )h)  $D_{10}$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )

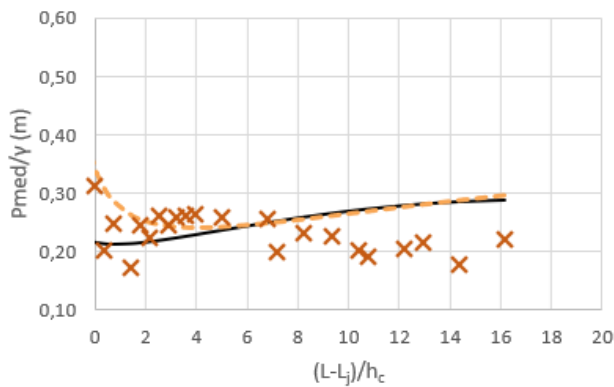
Figura 17.7 – Representação de  $P_{5\%}$ , na face vertical dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).



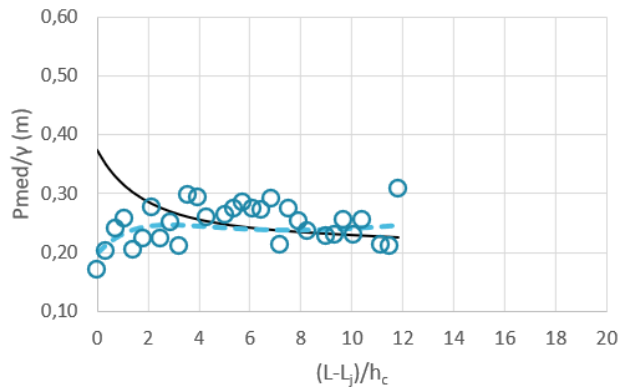
a)  $D_1$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )



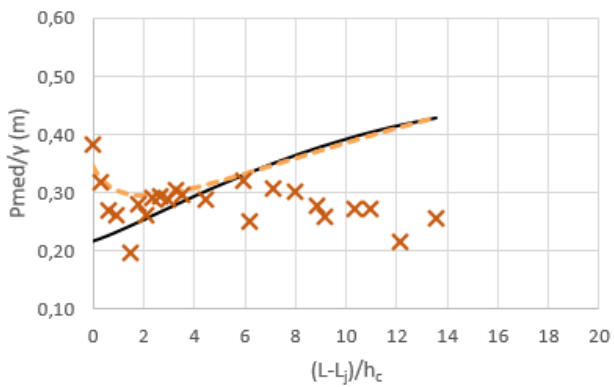
b)  $D_{10}$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )



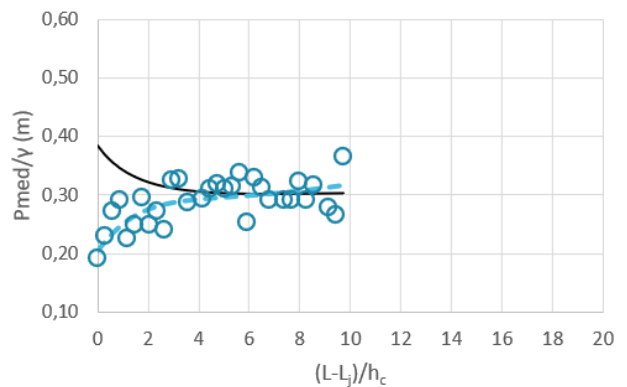
c)  $D_1$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )



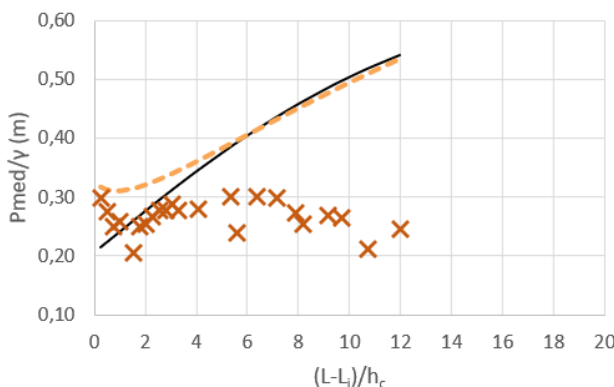
d)  $D_{10}$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )



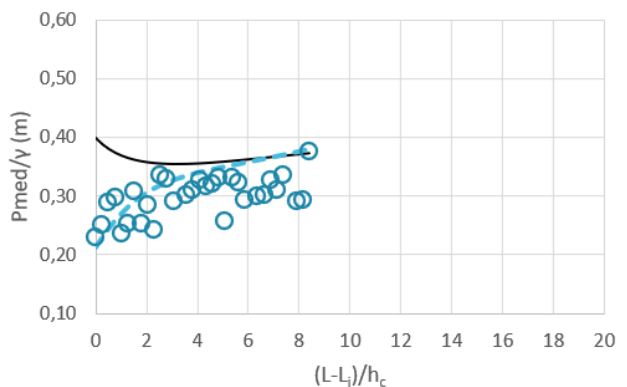
e)  $D_1$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )



f)  $D_{10}$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )



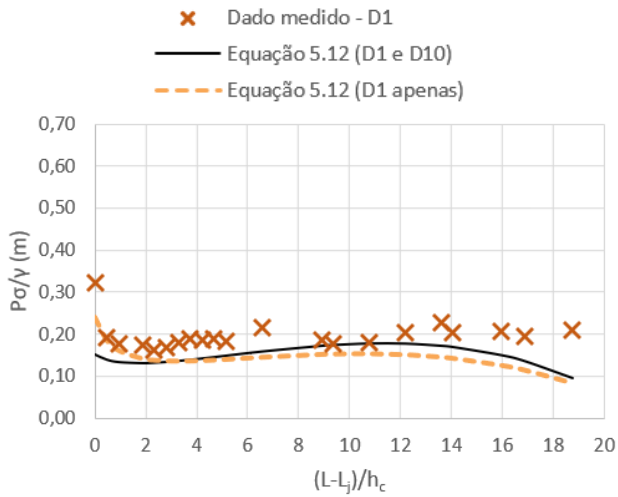
g)  $D_1$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )



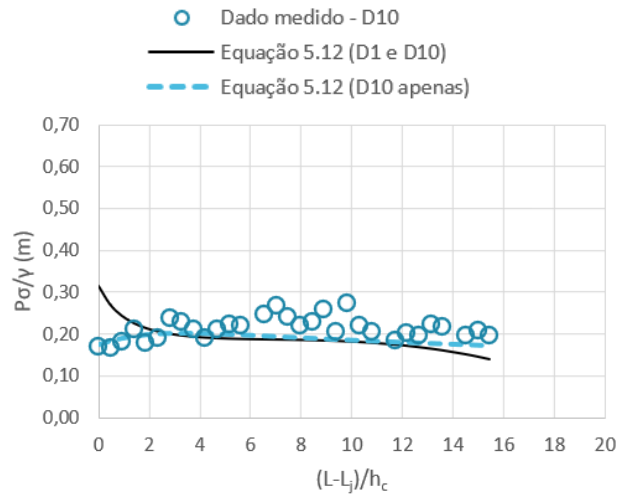
h)  $D_{10}$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )

Figura 17.8 – Representação de  $P_{med}$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).

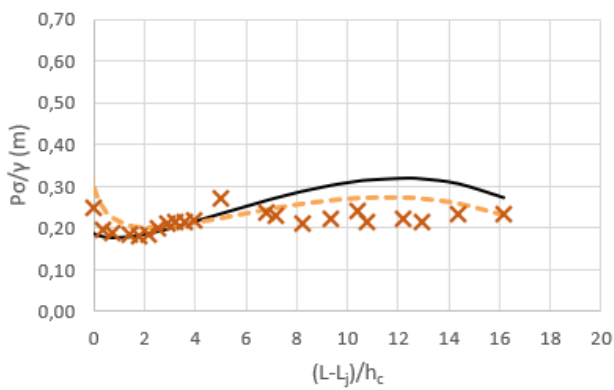




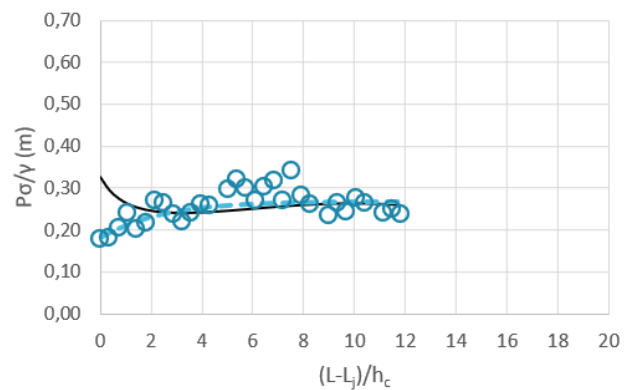
a)  $D_1$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )



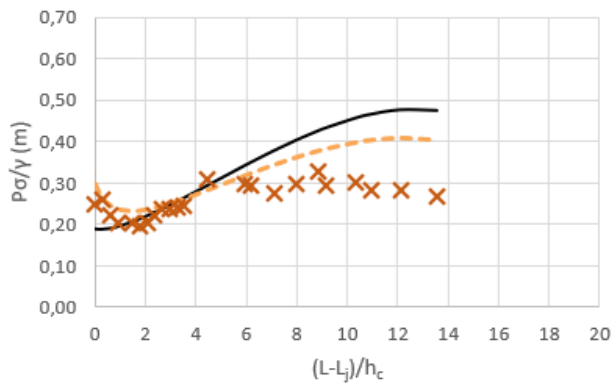
b)  $D_{10}$  ( $q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s}$ )



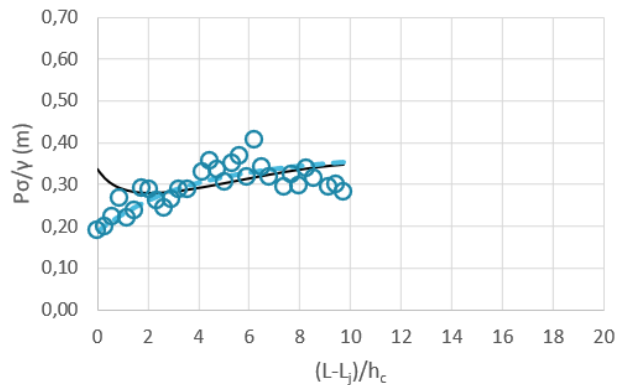
c)  $D_1$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )



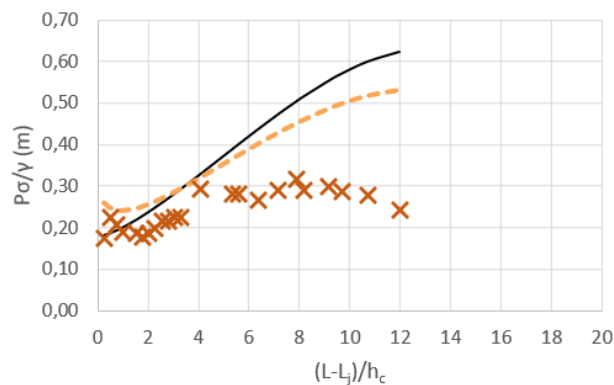
d)  $D_{10}$  ( $q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s}$ )



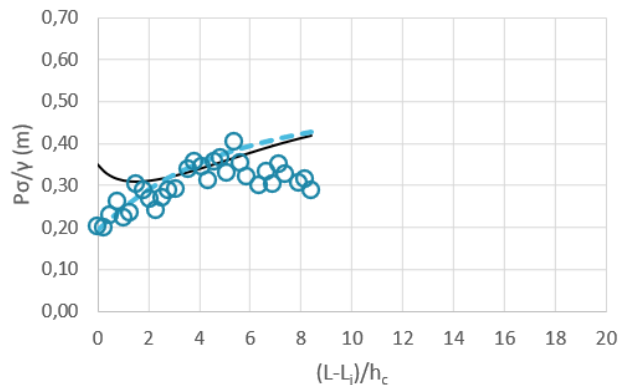
e)  $D_1$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )



f)  $D_{10}$  ( $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$ )

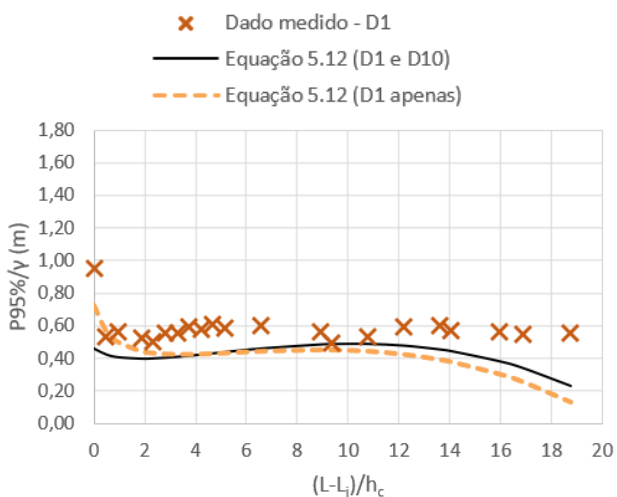


g)  $D_1$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )

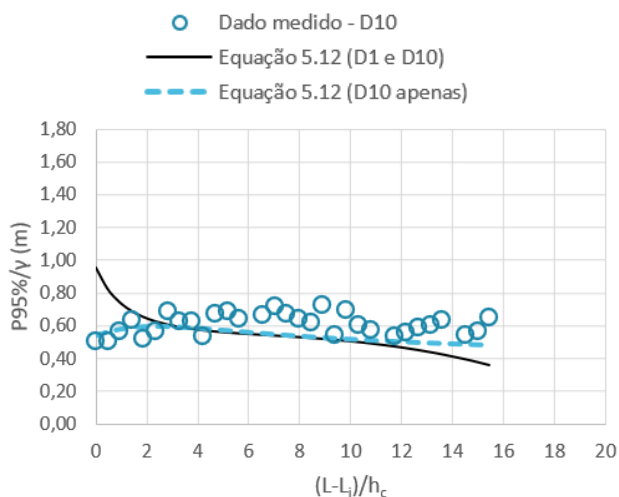


h)  $D_{10}$  ( $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ )

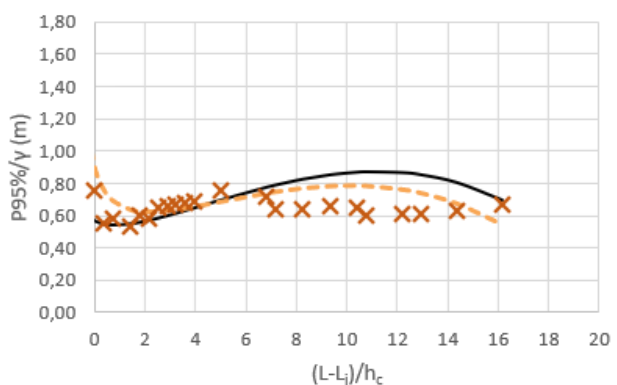
Figura 17.9 – Representação de  $P_\sigma$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).



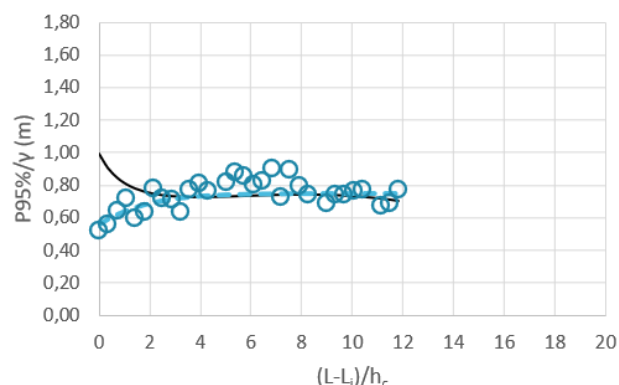
a)  $D_1 (q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s})$



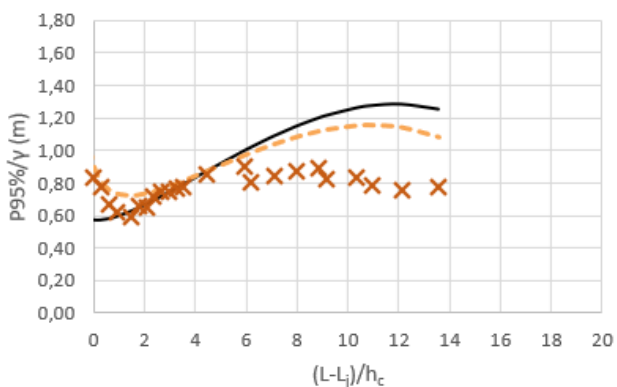
b)  $D_{10} (q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s})$



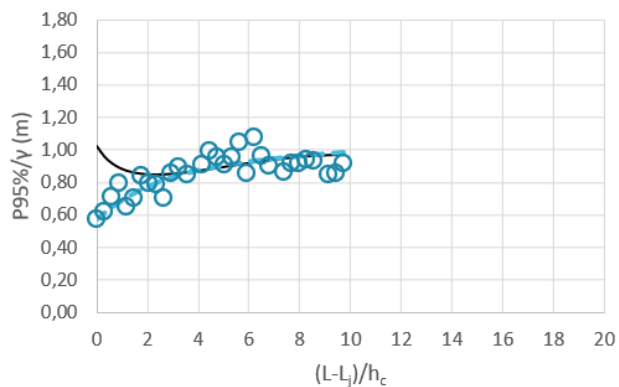
c)  $D_1 (q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s})$



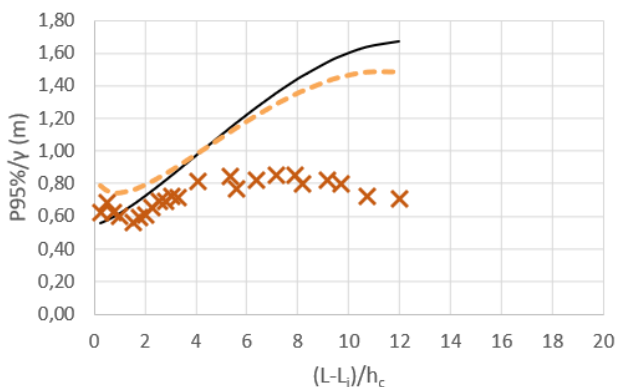
d)  $D_{10} (q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s})$



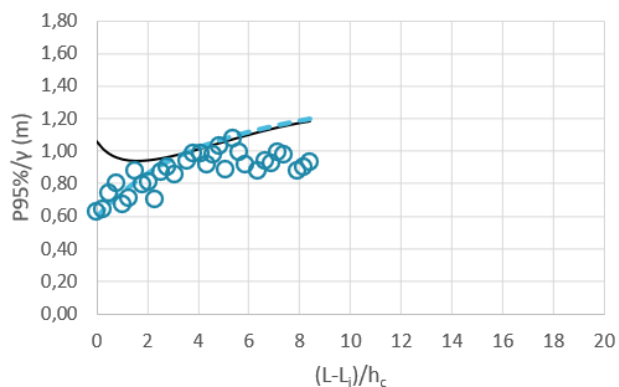
e)  $D_1 (q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s})$



f)  $D_{10} (q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s})$



g)  $D_1 (q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s})$



h)  $D_{10} (q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s})$

Figura 17.10 – Representação de  $P_{95\%}$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).

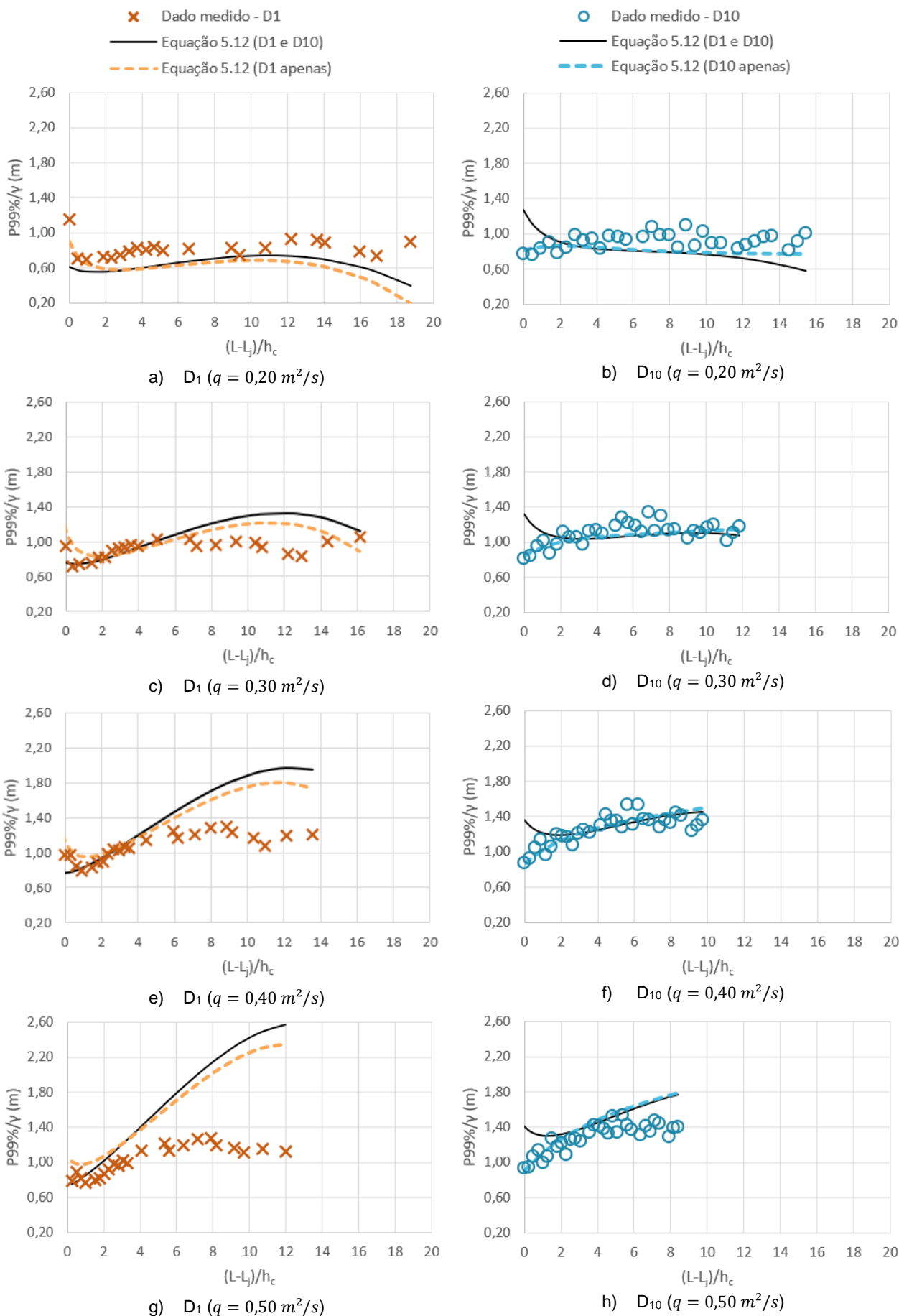
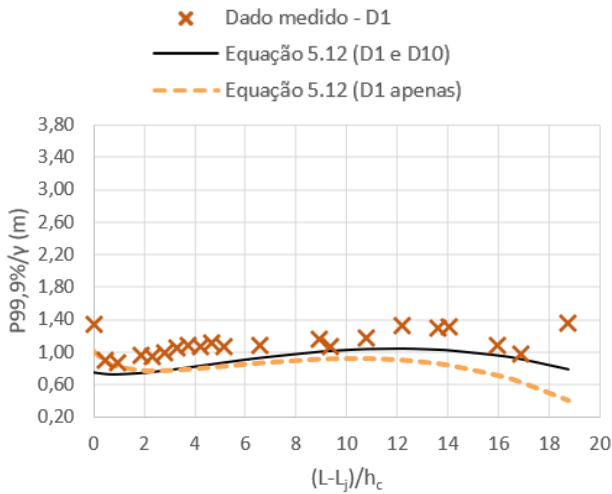
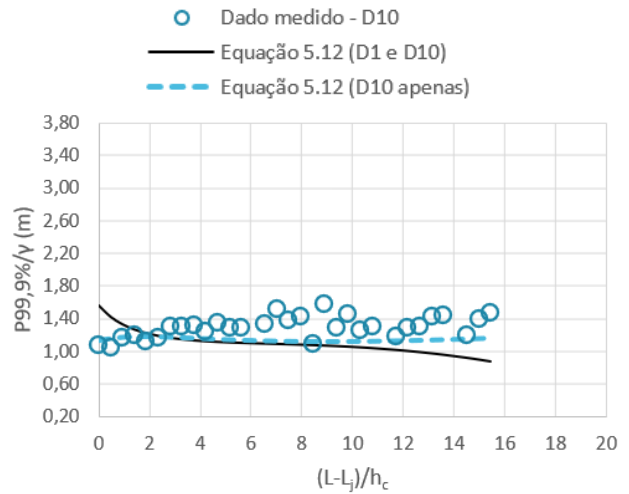


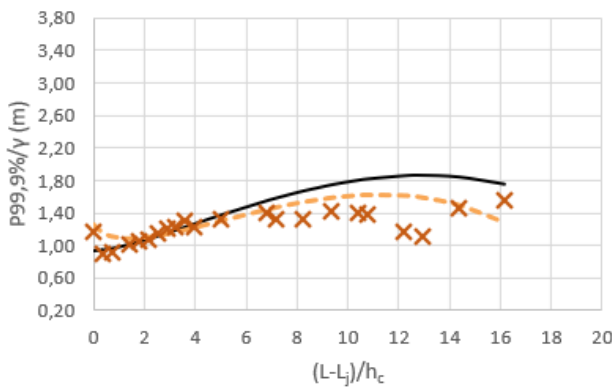
Figura 17.11 – Representação de  $P_{99\%}$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).



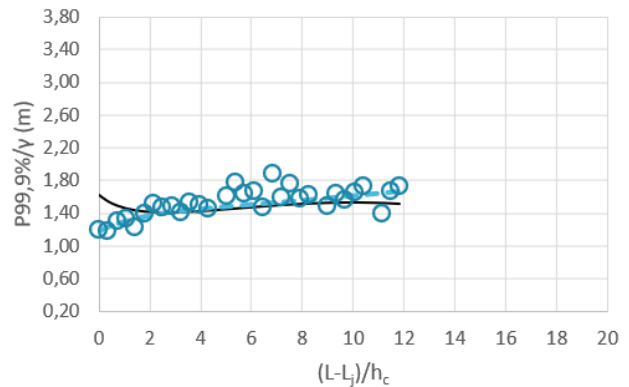
a)  $D_1 (q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s})$



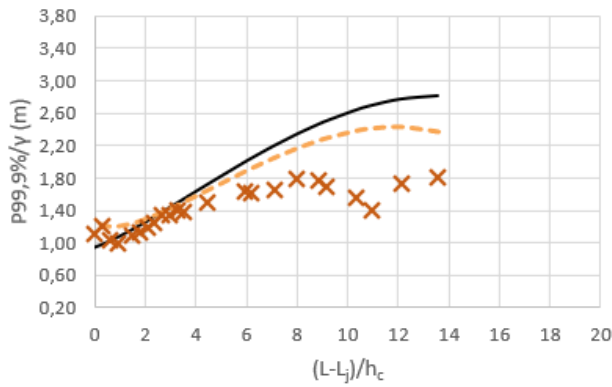
b)  $D_{10} (q = 0,20 \text{ m}^2/\text{s})$



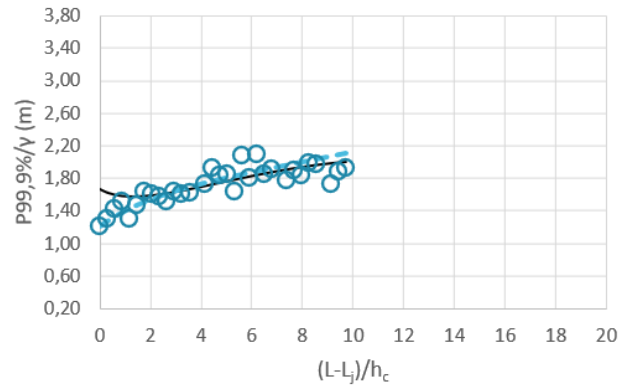
c)  $D_1 (q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s})$



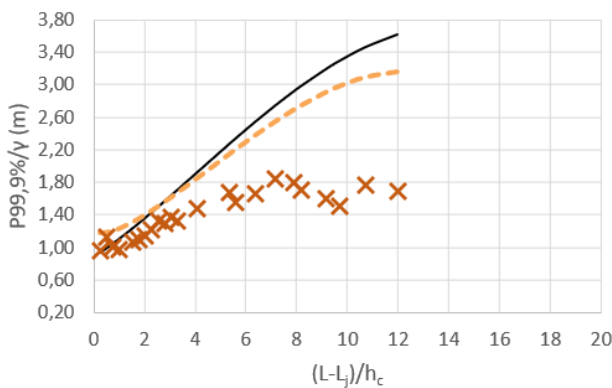
d)  $D_{10} (q = 0,30 \text{ m}^2/\text{s})$



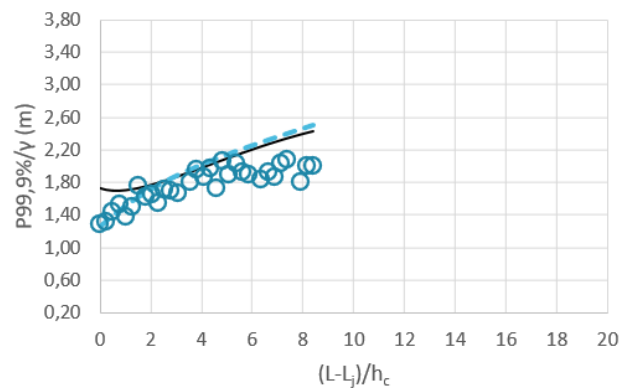
e)  $D_1 (q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s})$



f)  $D_{10} (q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s})$



g)  $D_1 (q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s})$



h)  $D_{10} (q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s})$

Figura 17.12 – Representação de  $P_{99,9\%}$ , na face horizontal dos degraus, considerando as pressões medidas (em ensaio em modelo) e as pressões estimadas (com base nos modelos de previsão propostos).

## 18 APÊNDICE J

### CONCENTRAÇÃO DE AR COM BASE EM NOVAKOSKI (2021)

Neste apêndice são apresentados os resultados provenientes da aplicação do método proposto por Novakoski (2021) para estimativa da concentração de ar no escoamento sobre vertedouros, através da análise visual. O método proposto pela autora considera a estimativa de  $C_b$  com base nas medições de velocidade de entrada de ar (por meio da sonda Pitot-Prandtl, no tubo de adução), das pressões e da profundidade do escoamento, esta última determinada por meio de fotografias e vídeos dos ensaios.

Resumidamente, a abordagem utilizada por Novakoski (2021) está baseada em diferentes metodologias, a depender da região do escoamento, nomeadas pela referida autora como:

- i. “Relação  $Q_{ar} \times h_{aer}$ ”: metodologia utilizada a partir do impacto do jato até o final da *blackwater*. Considera que todo o ar inserido pelo sistema aerador se distribui na porção inferior do escoamento, onde há uma separação bem definida entre a porção aerada e o núcleo de *blackwater*,
- ii. “Relação  $P \times h_{naer}$ ” e “Relação  $h_{aer} \times h_{naer}$ ”: aplicadas na região onde o escoamento é totalmente aerado (em profundidade), para estimativa da concentração de ar média. Em seguida, aplica-se um modelo teórico experimental adaptado por Matos (1999), para determinação da concentração de ar no fundo  $C_b$ .

Para mais detalhes do método, ver Novakoski (2021).

A Figura 18.1 apresenta a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  ao longo da calha. Os resultados são oriundos da aplicação do método proposto por Novakoski (2021), bem como de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), nas condições de aeração induzida  $D_1$  (à esquerda na Figura 18.1) e  $D_{10}$  (à direita), considerando o intervalo de vazão específica em modelo de  $0,20 \text{ m}^2/\text{s} \leq q \leq 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Para melhor visualização e interpretação, a representação da concentração de ar  $C_b$  está limitada ao intervalo  $0 \leq C_b \leq 0,35$ , além disso, os resultados são apresentados de forma discreta (não estão conectados por linhas).

Na Figura 18.1, os dados da condição  $D_1$  são os próprios valores estimados por Novakoski (2021), na mesma instalação experimental da presente pesquisa, ao passo que os da condição  $D_{10}$  foram calculados de acordo com o método e os critérios sugeridos pela referida autora. Nesse caso, a abordagem considerada na condição  $D_{10}$  foi a chamada “Relação  $P \times h_{naer}$ ”, visto que é o método que melhor se aplica ao escoamento nessa condição. Não foi possível aplicar a “Relação  $Q_{ar} \times h_{aer}$ ” para  $D_{10}$  pois, em razão das características do escoamento nessa configuração, não há separação bem definida entre a porção aerada e o núcleo de *blackwater*. Isso porque, na condição

$D_{10}$ , a *blackwater* termina ou enquanto o jato ainda está em desenvolvimento, ou logo a jusante do impacto deste, como apresentado no item 5.2, o que inviabiliza o uso dessa abordagem.

Pela Figura 18.1 é possível identificar que, na condição  $D_1$ , logo a jusante do impacto do jato nos degraus (e, portanto, em uma região abaixo da *blackwater*), os resultados obtidos por Novakoski (2021) são muito próximos aos de Pfister et al. (2006a) – fato que, indiretamente, pode contribuir na validação de ambos os métodos nesse trecho. Ainda com relação à condição  $D_1$ , mais a jusante, os resultados oriundos dos métodos de Pfister et al. (2006a) e Novakoski (2021) são mais distintos entre si, de modo que os desta última adquirem caráter mais disperso e aleatório, provavelmente, em razão da natureza subjetiva do método (principalmente, na medição das profundidades do escoamento).

Importante observar que, na condição  $D_1$ , a maior dispersão entre os resultados de Pfister et al. (2006a) e Novakoski (2021) inicia, aproximadamente, na região associada ao final da *blackwater* (ver Tabela 5.5). Isso pode ser explicado, principalmente, em razão do encontro entre a aeração inferior do escoamento (abaixo da *blackwater*, proveniente do sistema aerador) com a aeração superior (acima da *blackwater*, proveniente da superfície), que dificulta a estimativa da concentração de ar por Novakoski (2021).

Já na condição  $D_{10}$ , os resultados da aplicação do método proposto por Novakoski (2021) não se assemelham aos resultantes do modelo de Terrier (2016), nem mesmo logo a jusante do impacto do jato. Isso pode ser justificado em razão de praticamente não existir *blackwater*, a jusante do impacto do jato, na condição  $D_{10}$  (diferentemente da condição  $D_1$ ), o que, nesse caso, impossibilita a aplicação da chamada “Relação  $Q_{ar} \times h_{aer}$ ” de Novakoski (2021), como já mencionado.

Quando comparados os resultados de  $C_b$  por Novakoski (2021) entre as condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , parece não haver sentido físico nos valores obtidos nas vazões  $q = 0,40 \text{ m}^2/\text{s}$  e  $q = 0,50 \text{ m}^2/\text{s}$ . Isso porque, de acordo com a Figura 18.1, na maior parte da calha haveria mais ar no escoamento na condição  $D_1$  do que na condição  $D_{10}$ , o que, em razão do coeficiente  $\beta$  medido nos ensaios e do aspecto visual do escoamento, não parece razoável.

Assim, conclui-se que os resultados provenientes da aplicação da metodologia proposta por Novakoski (2021) não resultaram, de modo geral, próximos aos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016) – com exceção do trecho logo após o impacto do jato na condição  $D_1$ , que indicou resultados muito próximos aos oriundos da aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a). Vale destacar, contudo, que a abordagem indicada por Novakoski (2021) não deve ser descartada, uma vez que pode ser uma alternativa interessante na estimativa preliminar e simplificada da concentração de ar, quando há modelo físico que permita a medição dos parâmetros necessários (isto é, em resumo, a medição do coeficiente  $\beta$ , das profundidades do escoamento e das pressões sobre a calha do vertedouro).

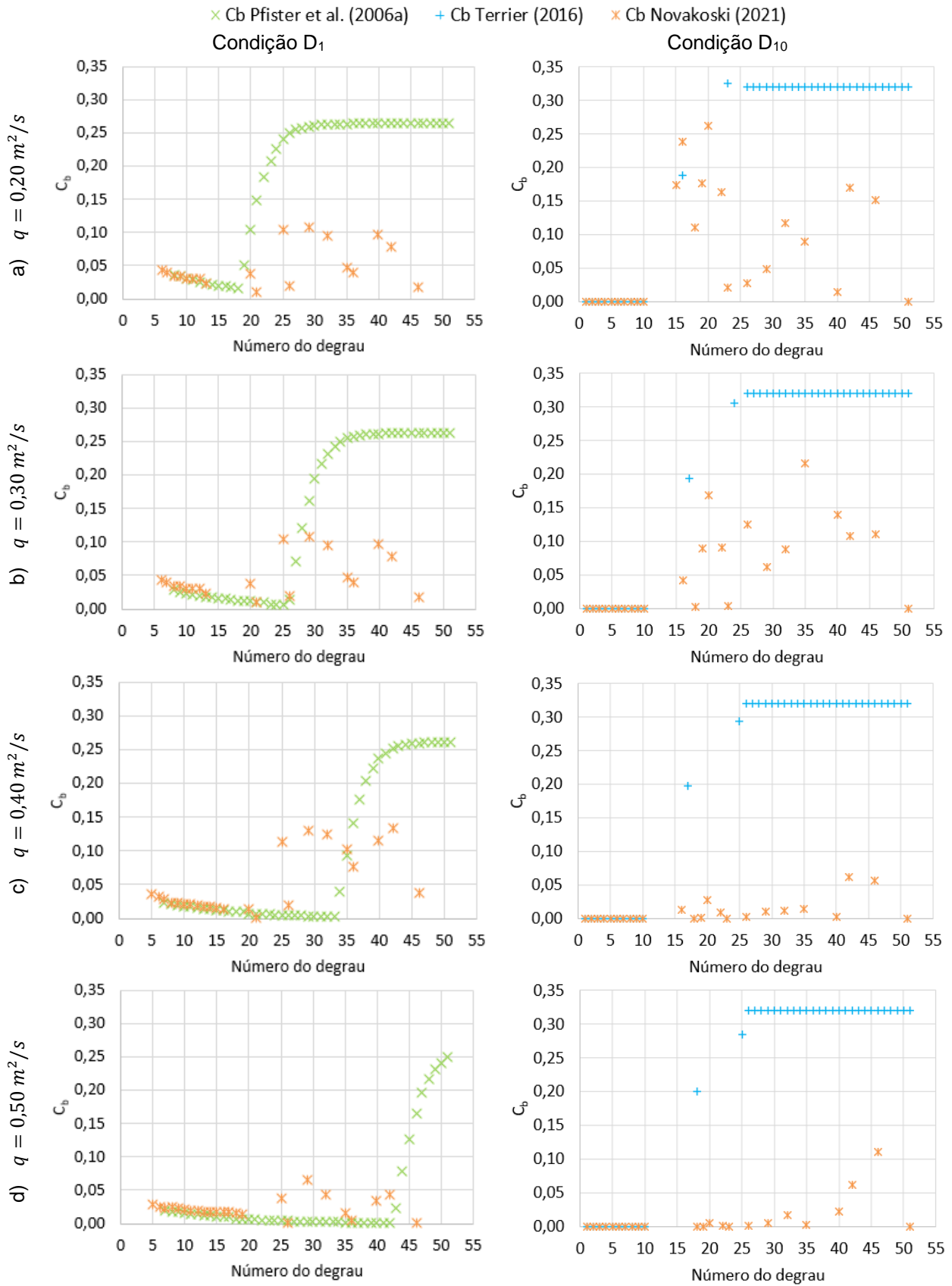


Figura 18.1 – Concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  ao longo da calha, nas condições de aeração induzida ( $D_1$  e  $D_{10}$ ), pelas metodologias de Pfister et al. (2006a), Terrier (2016) e Novakoski (2021).

## 19 APÊNDICE K

### ANÁLISE DAS PRESSÕES EM CONJUNTO COM A CONCENTRAÇÃO DE AR

Este item trata sobre a análise conjunta entre a concentração de ar no fundo do escoamento  $C_b$  e as pressões hidrodinâmicas sobre a calha, visando avaliar as prováveis zonas críticas à ocorrência de danos por cavitação, do mesmo modo como apresentado no item 5.6.3. A Figura 5.33 (do item 5.6.3) apresentou os resultados considerando os valores de pressão extrema  $P_{0,1\%}$  (nas faces verticais dos degraus), transpostos para valores compatíveis a protótipo, considerando a escala geométrica 1:15 entre modelo (instalação experimental) e protótipo. Neste apêndice tem-se os resultados para  $P_{0,1\%}$ ,  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$ , considerando as escalas geométricas 1:10 ( $h_d = 0,60 m$  no protótipo), 1:15 ( $h_d = 0,90 m$ ) e 1:20 ( $h_d = 1,20 m$ ). Nesta análise, os valores de pressão considerados foram os medidos durante os ensaios (transferidos para a escala de protótipo).

Reforça-se que a estimativa de  $C_b$  considera, na condição de aeração natural (NAT), o modelo de Matos (1999). Já nas condições de aeração induzida,  $D_1$  e  $D_{10}$ , considera-se, respectivamente, os modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), conforme critérios e discussões já expostos no item 5.6.3. Porém, na tentativa de avaliar  $C_b$  na aeração induzida por meio de uma abordagem mais simplificada e direta, a título de comparação, os resultados associados à  $C_b$  nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  foram calculados não apenas com base nos modelos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), mas também estimados com base no modelo de Matos (1999). Trata-se, porém, de uma simplificação, valendo, nesse caso, os seguintes critérios (admitidos apenas neste contexto):

- i.  $C_b$  por Matos (1999) na condição  $D_{10}$ : nesse caso, considera-se que os resultados de Matos (1999) associados a  $C_b > 0$  (isto é, o início do trecho ascendente de  $C_b$ ) inicia a partir do ponto de impacto do jato nos degraus. Essa hipótese parece razoável uma vez que, na condição  $D_{10}$ , a jusante do impacto do jato nos degraus, sempre há aumento da concentração de ar no fundo do escoamento (ou seja, de modo semelhante ao que ocorre na série de  $C_b$  na condição NAT);
- ii.  $C_b$  por Matos (1999) na condição  $D_1$ : já no caso da condição  $D_1$ , diferentemente da  $D_{10}$ ,  $C_b$  decai a jusante do impacto do jato sobre os degraus, assim, não se pode considerar o mesmo critério que o utilizado na condição  $D_{10}$ . Então, na condição  $D_1$ , optou-se por considerar os resultados provenientes do modelo de Matos (1999) desde o início da calha em degraus. Assim, os valores da aplicação do modelo de Matos (1999) na condição  $D_1$  serão os mesmos que os obtidos na condição NAT.

Vale destacar que a análise de  $C_b$  por Matos (1999) nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  é uma aproximação, uma vez que o comportamento do escoamento é distinto entre as condições de aeração natural – situação para a qual o modelo de Matos (1999) foi desenvolvido – e induzida. A grande vantagem da utilização do modelo de Matos (1999) frente aos de Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016) é a



simplicidade do modelo. De qualquer forma, reforça-se que a referida análise se trata de uma simplificação, tendo caráter ilustrativo, apenas.

Nas figuras a seguir, as regiões onde  $P/\gamma < -10 \text{ m}^{70}$  e  $C_b < 0,07$  aparecem em destaque, com preenchimento vermelho, uma vez que estão associadas à possibilidade de danos oriundos da cavitação (conforme os mesmos critérios indicados no item 5.6.3). Na delimitação das zonas críticas, foram consideradas as séries de  $C_b$  resultantes da aplicação dos modelos de Matos (1999), Pfister et al. (2006a) e Terrier (2016), respectivamente, nas condições NAT,  $D_1$  e  $D_{10}$ . Assim, ainda que esteja representada a série associada a  $C_b$  por Matos (1999) também nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$ , este resultado não foi considerado na delimitação das zonas críticas, estando representado apenas a título de comparação, como já mencionado. Ainda, para facilitar o entendimento dos resultados nos gráficos, os dados associados à  $C_b$  nas condições  $D_1$  e  $D_{10}$  não estão conectados por linhas.

De acordo com os critérios expostos, a análise das figuras a seguir (Figura 19.1 até Figura 19.9) permite as seguintes observações:

- i. Figura 19.1 até Figura 19.3: Considerando um protótipo com  $h_d = 0,60 \text{ m}$  (escala geométrica 1:10,  $6,3 \text{ m}^2/\text{s} \leq q_p \leq 15,8 \text{ m}^2/\text{s}$ ), os resultados obtidos indicam que a estrutura não estaria exposta à cavitação em nenhuma condição (seja NAT,  $D_1$  ou  $D_{10}$ ), nem mesmo considerando o critério da pressão extrema  $P_{0,1\%}$ ;
- ii. Figura 19.4 até Figura 19.6: Já para um protótipo com  $h_d = 0,90 \text{ m}$  (escala geométrica 1:15,  $11,6 \text{ m}^2/\text{s} \leq q_p \leq 29 \text{ m}^2/\text{s}$ ), considerando  $P_{0,1\%}$  como critério à decisão, na condição NAT, a região entre os degraus nº15 e 35 estaria sujeita a danos. Na condição  $D_1$  (tendo ainda  $P_{0,1\%}$  como critério), mesmo existindo o aerador, os resultados sugerem que a zona entre os degraus nº15 e 40 estaria em risco, ao passo que, na condição  $D_{10}$ , de acordo com os critérios adotados, nenhuma região estaria exposta a danos. Levando em conta as pressões extremas  $P_{1\%}$  e  $P_{5\%}$  na tomada de decisão, os resultados indicam que não haveria zona crítica à risco em nenhuma condição (seja NAT,  $D_1$  ou  $D_{10}$ );
- iii. Figura 19.7 até Figura 19.9: Para um protótipo com  $h_d = 1,20 \text{ m}$  (escala geométrica 1:20,  $17,9 \text{ m}^2/\text{s} \leq q_p \leq 44,7 \text{ m}^2/\text{s}$ ), levando em conta  $P_{0,1\%}$ , nas condições NAT e  $D_1$  há zona crítica entre os degraus nº10 e 45, aproximadamente. Já na condição  $D_{10}$ , apenas em um ponto, pouco a montante do local onde está instalado o aerador. Considerando  $P_{1\%}$ , os resultados nas condições NAT e  $D_1$  também indicam que haveria uma região exposta a danos (entre os degraus nº15 e 45, aproximadamente). Se

<sup>70</sup> Tais valores de pressão parecem indicar a possibilidade da ocorrência de cavitação no protótipo, de modo que não haveria presença de água (no estado líquido) na região. Porém, esses resultados devem ser entendidos unicamente como indicativos de que a região poderá estar exposta ao fenômeno da cavitação, não tendo correspondência com a pressão que ocorreria na realidade.

- fossem levados em conta os resultados associados à  $P_{5\%}$  na tomada de decisão, nenhuma região estaria exposta a risco, para nenhuma condição (seja NAT,  $D_1$  ou  $D_{10}$ );
- iv. Avaliando os resultados de  $C_b$  associados à condição  $D_1$ , caso fosse utilizado o modelo de Matos (1999) – conforme critério exposto anteriormente – os resultados seriam superiores aos obtidos pela aplicação do modelo de Pfister et al. (2006a), em alguns pontos ao longo da calha. Assim, assumindo que o modelo de Pfister et al. (2006a) é mais representativo na estimativa da concentração de ar  $C_b$  na condição  $D_1$ , considerar válida a hipótese e adotar os resultados provenientes do modelo de Matos (1999) seria desfavorável à segurança, nessa situação;
  - v. Já com relação à  $C_b$  na condição  $D_{10}$ , os resultados indicam que, caso fosse adotado o modelo de Matos (1999) na estimativa preliminar de resultados – em vez do modelo de Terrier (2016) – trabalhar-se-ia com valores favoráveis à segurança. Isso porque, valendo-se da hipótese de que os resultados de Terrier (2016) são coerentes com o que seria observado na realidade, o modelo de Matos (1999) sempre indicou resultados inferiores aos do modelo de Terrier (2016).

Com isso, pode-se concluir:

- i. Quando instalado em local adequado, o sistema aerador permite aumento significativo (algumas vezes, de mais de 100%) nas vazões específicas escoadas sobre a calha, sem que esta apresente regiões suscetíveis a danos por cavitação. Isso porque, de acordo com os resultados apresentados, a condição  $D_{10}$  sugere a possibilidade de passagem de vazões superiores a  $40 \text{ m}^2/\text{s}$ , sem apresentar regiões em risco, ao passo que, na condição NAT, a vazão sem risco se limitaria à ordem de 15 a  $20 \text{ m}^2/\text{s}$ ;
- ii. Para garantir a melhor eficiência do sistema, é imprescindível o estudo prévio do local ideal, ao longo da calha, onde será instalado o aerador. Isso porque, como sugerem os resultados apresentados, as vazões máximas que não estão associadas a danos foram, na condição  $D_1$ , muito semelhantes às da condição NAT. Ou seja, de acordo com os critérios adotados, a instalação de um aerador nas proximidades da ogiva do vertedouro (condição  $D_1$ ) não resultaria em ganho significativo, quando comparada à condição sem aerador nenhum (NAT), no que diz respeito ao possível incremento de vazões máximas do escoamento sobre a estrutura.  
Vale destacar que a geometria do sistema aerador é a mesma, seja na condição  $D_1$  ou  $D_{10}$ . A única diferença está no posicionamento do sistema ao longo da calha, o que faz com que este seja mais eficiente na condição  $D_{10}$  do que na condição  $D_1$ ;
- iii. A estimativa preliminar, simplificada e favorável à segurança de  $C_b$  nas situações de aeração induzida pode ser feita pelo modelo de Matos (1999), desde que o aspecto visual do escoamento seja semelhante ao de Terrier (2016) – e da condição  $D_{10}$  aqui avaliada – ou, em outras palavras, desde que o jato do escoamento após o defletor

esteja aerado, em profundidade, antes do contato com a calha (de modo que não exista *blackwater* a jusante do impacto do jato). Essa simplificação não é válida quando a *blackwater* se estende consideravelmente para além do impacto do jato – como no caso da condição  $D_1$  – pois os resultados não serão favoráveis à segurança.

Por fim, é importante destacar que, embora os resultados obtidos neste trabalho sugiram que a condição  $D_1$  não resultou em ganho significativo, em termos de vazão máxima, quando comparada com a condição NAT, isso não significa que, necessariamente, para todas as situações, um sistema aerador posicionado nas proximidades da ogiva do vertedouro não será eficiente. Isso porque a eficiência do sistema aerador não é função apenas do local onde está instalado, mas também das características geométricas do aerador (como altura  $t$  e ângulo  $\theta$ ) e dos parâmetros do escoamento (vazão, número de Froude etc.).

Em outras palavras, a combinação de vazões e a geometria do sistema aerador considerado no presente trabalho sugere que a condição  $D_1$  não parece eficiente, porém, talvez seria caso a altura  $t$  do defletor fosse maior, por exemplo. Inclusive, Terrier (2016) sugere que, para a maior eficiência do sistema, deve-se considerar a relação  $t/h_0 \geq 0,16$  (e no presente trabalho tem-se, na condição  $D_1$ ,  $0,07 \leq t/h_0 < 0,16$ ). Com isso, inclusive, pode-se sugerir que, em trabalhos futuros, sejam analisados defletores de maior altura  $t$ .

Para vertedouros em degraus com altura reduzida, talvez a única alternativa possível seja a de instalar-se um sistema aerador nas proximidades da ogiva (caso seja necessário e viável). Assim, essa alternativa (aqui denominada condição  $D_1$ ) não deve ser descartada, mas sim, avaliada com mais cuidado, de modo a selecionar a geometria do sistema mais eficiente nessa situação.

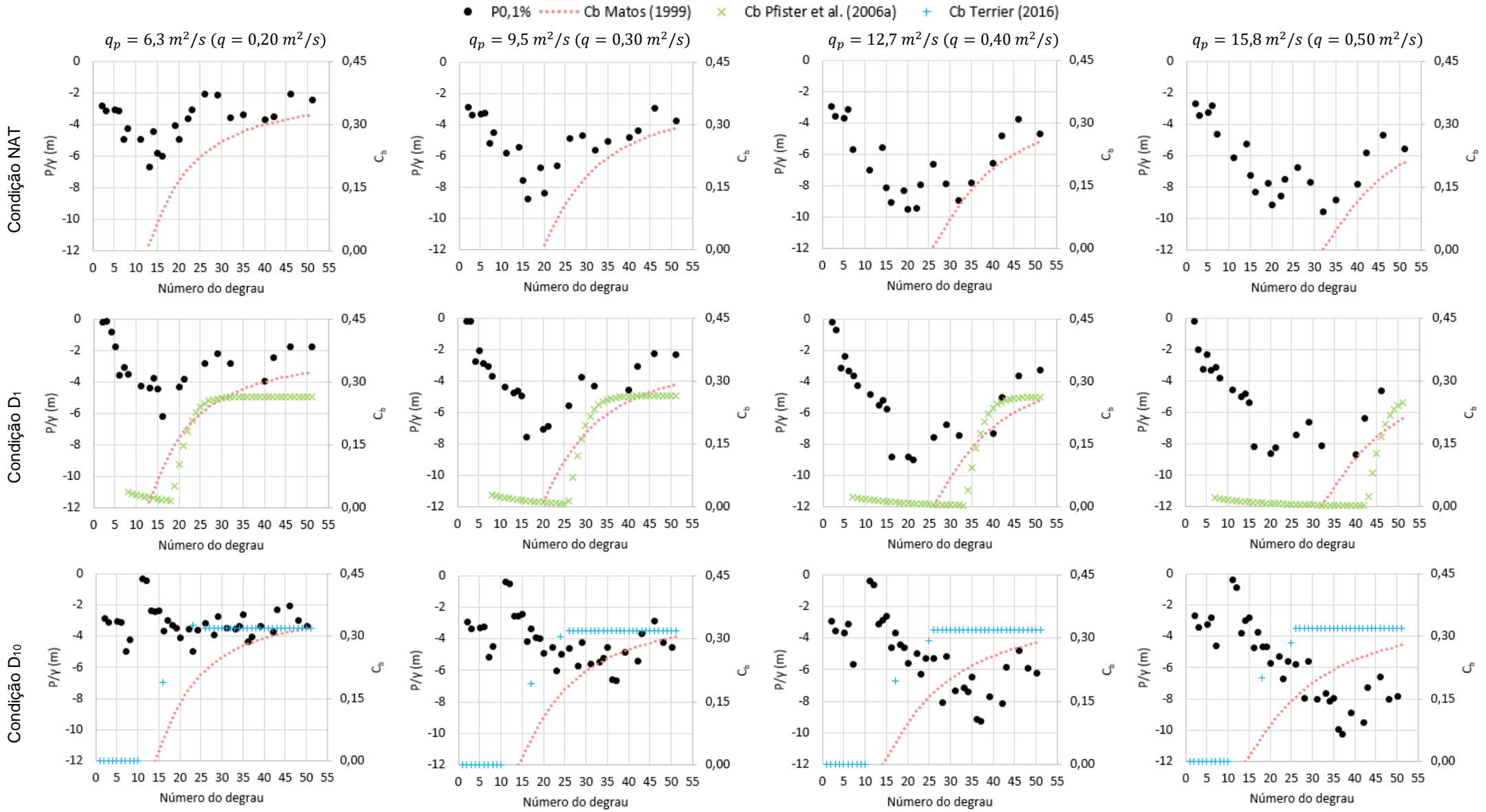
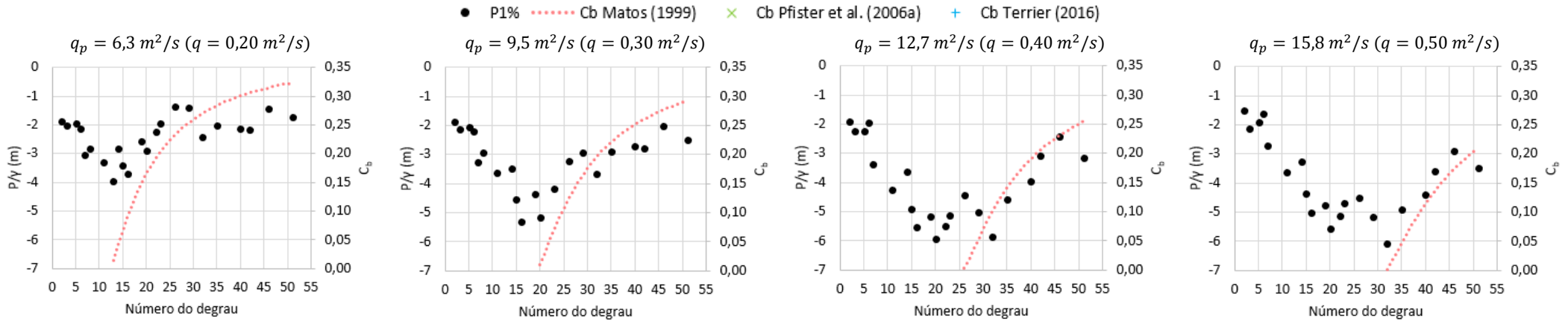
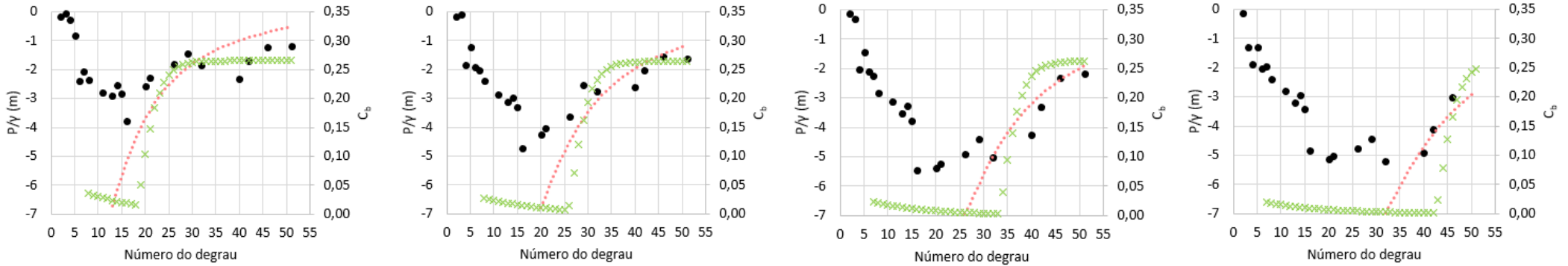


Figura 19.1 – Pressão  $P_{0,1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10, para a escala geométrica 1:10 ( $h_d = 0,60 \text{ m}$ ).

Condição NAT



Condição D1



Condição D10

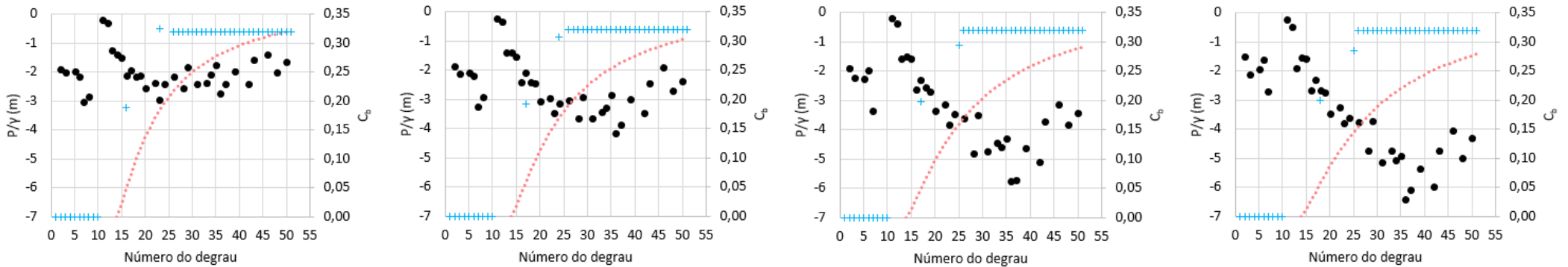


Figura 19.2 – Pressão  $P_{1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10, para a escala geométrica 1:10 ( $h_d = 0,60 \text{ m}$ ).

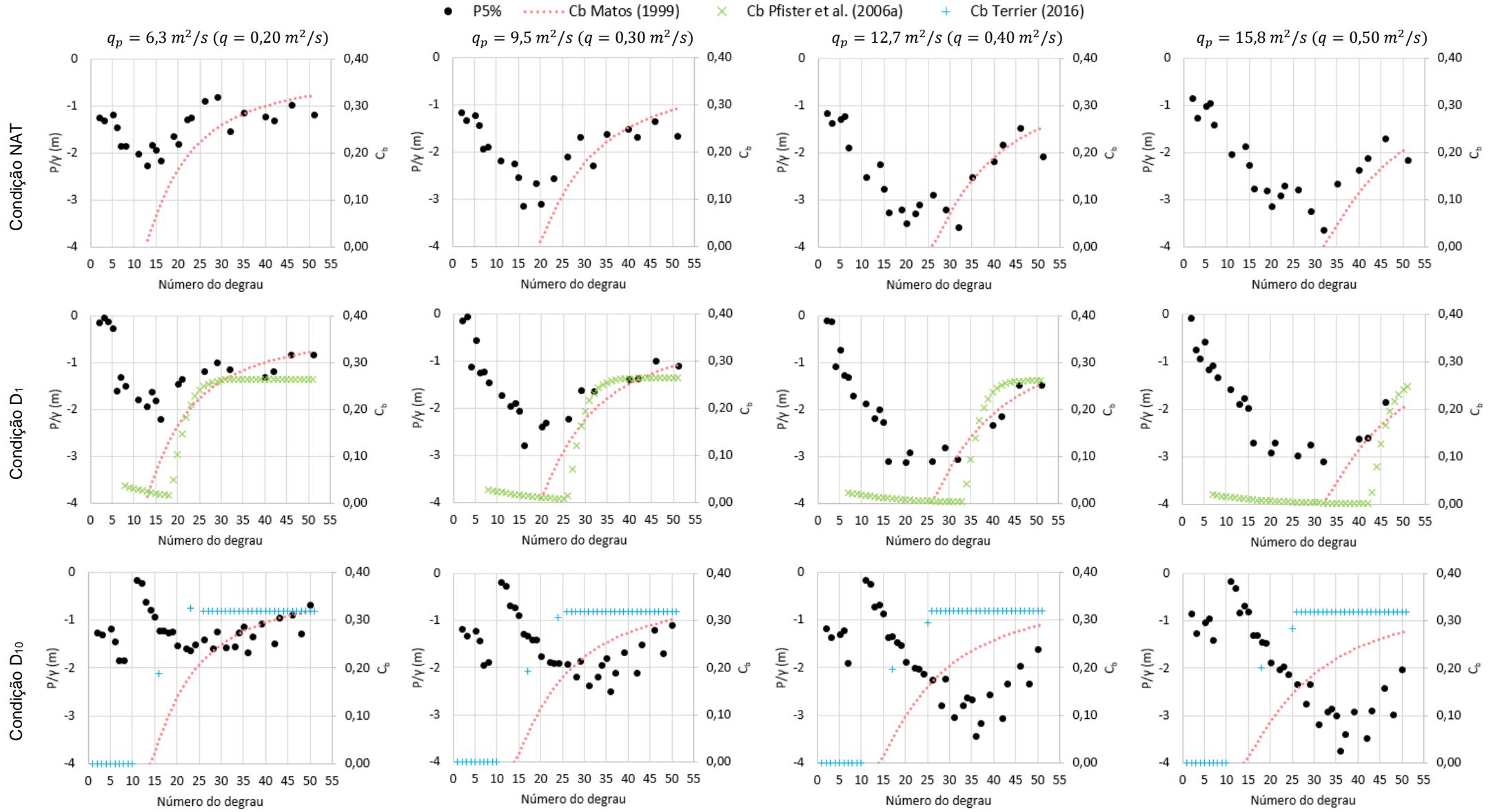


Figura 19.3 – Pressão  $P_{5\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10, para a escala geométrica 1:10 ( $h_d = 0,60 \text{ m}$ ).

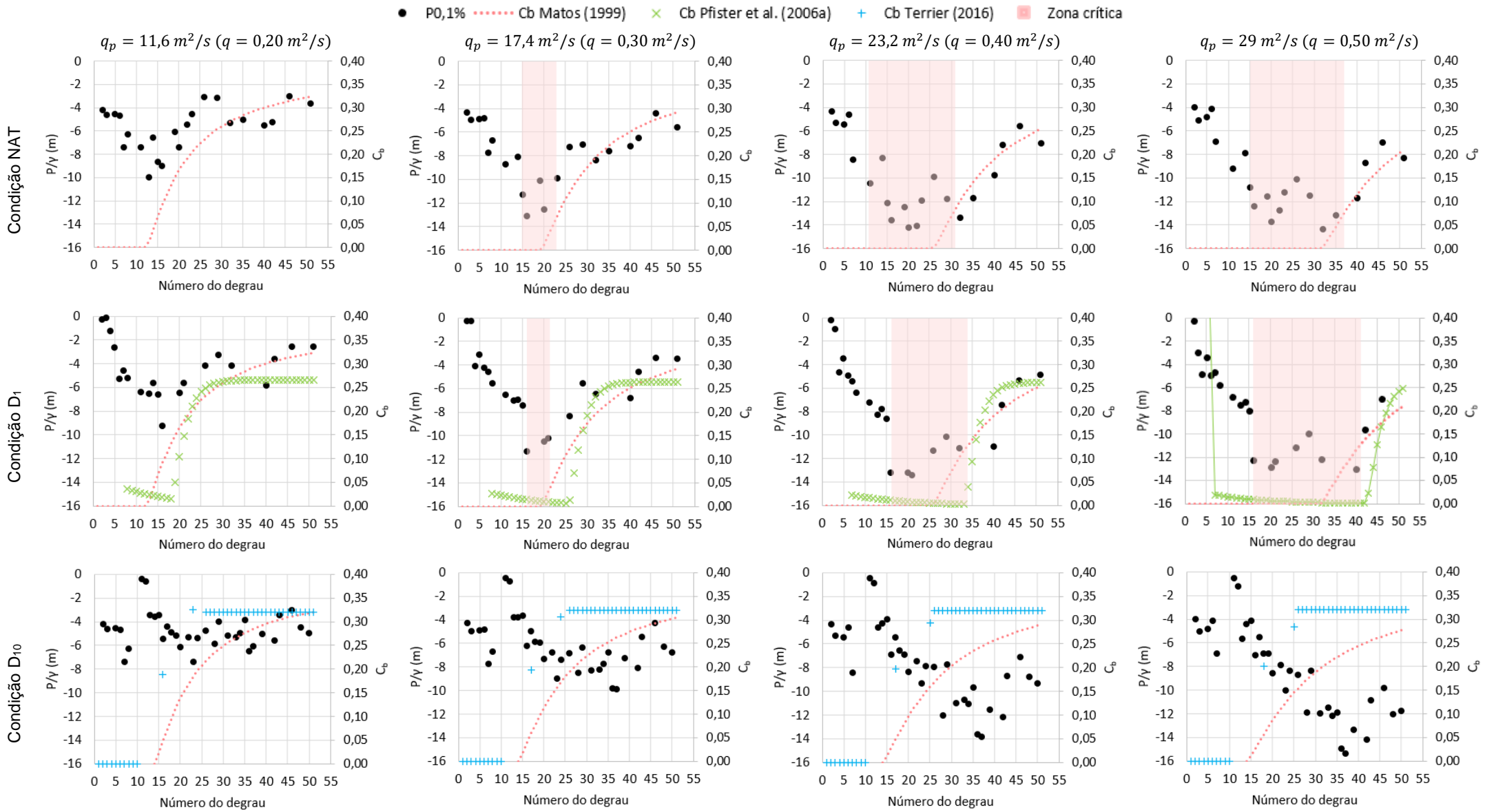


Figura 19.4 – Pressão  $P_{0,1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, para a escala geométrica 1:15 ( $h_d = 0,90 \text{ m}$ ).

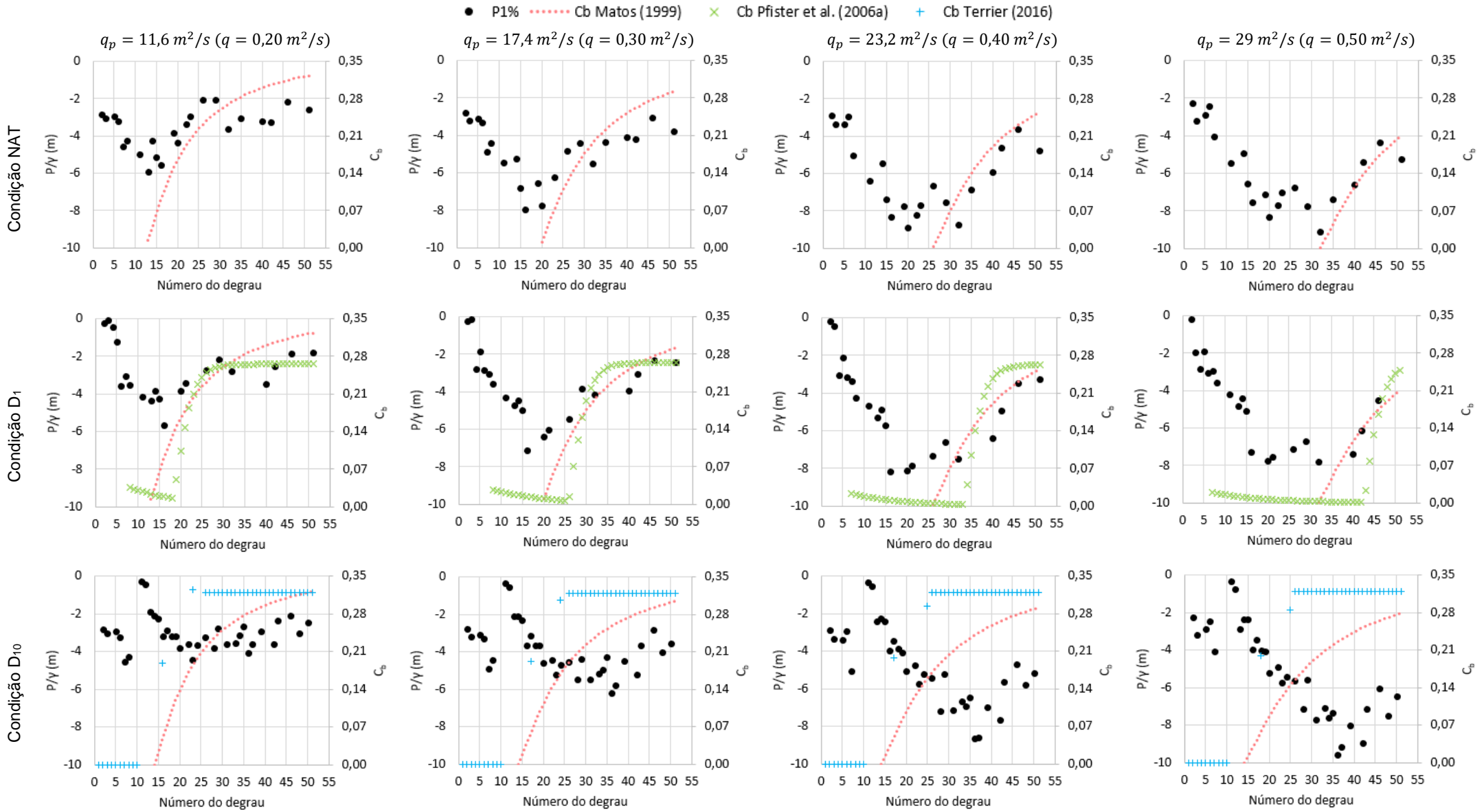


Figura 19.5 – Pressão  $P_{1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10, para a escala geométrica 1:15 ( $h_d = 0,90 \text{ m}$ ).



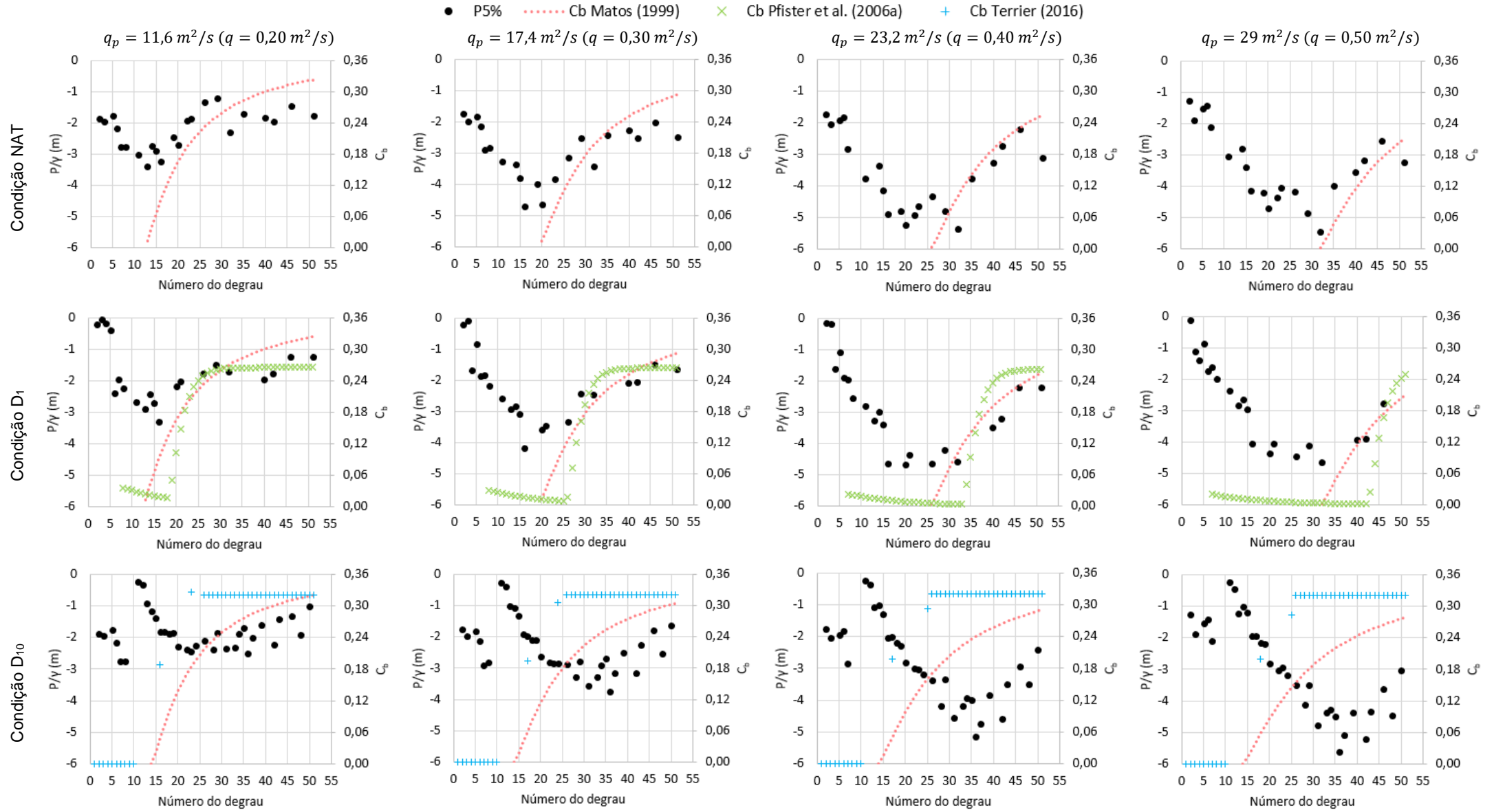


Figura 19.6 – Pressão  $P_{5\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, para a escala geométrica 1:15 ( $h_d = 0,90 \text{ m}$ ).

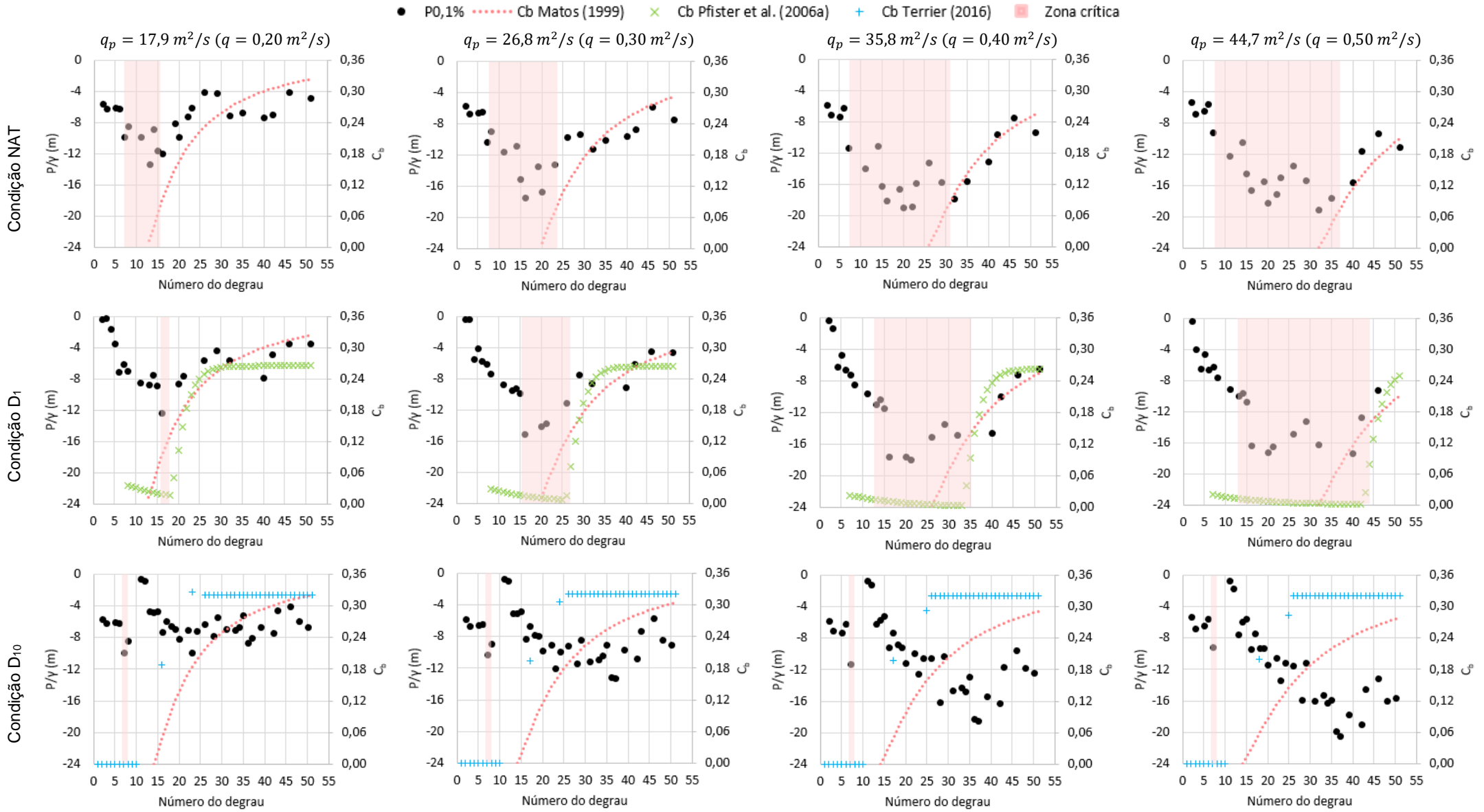


Figura 19.7 – Pressão  $P_{0,1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10, para a escala geométrica 1:20 ( $h_d = 1,20 \text{ m}$ ).

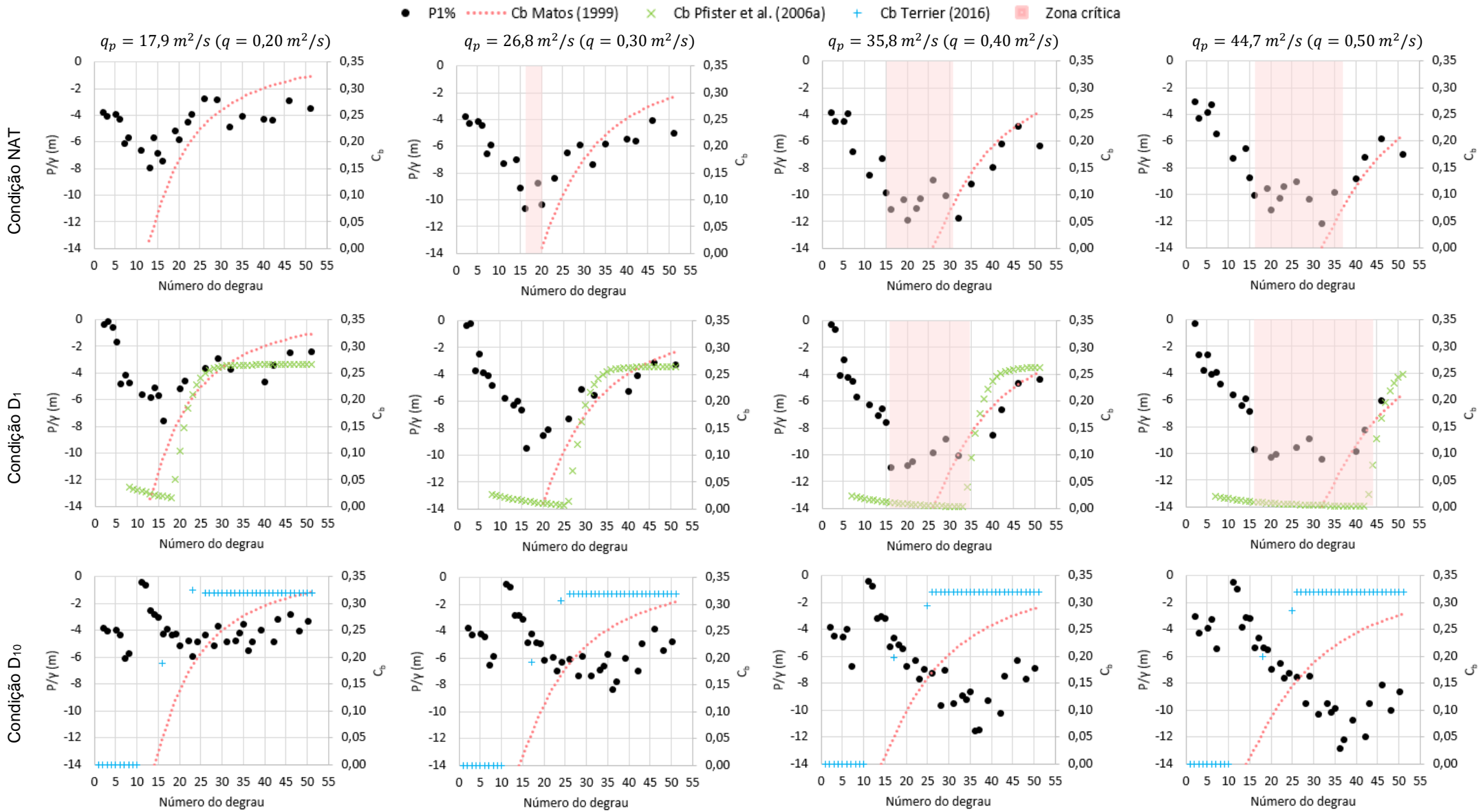


Figura 19.8 – Pressão  $P_{1\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D1 e D10, para a escala geométrica 1:20 ( $h_d = 1,20 \text{ m}$ ).

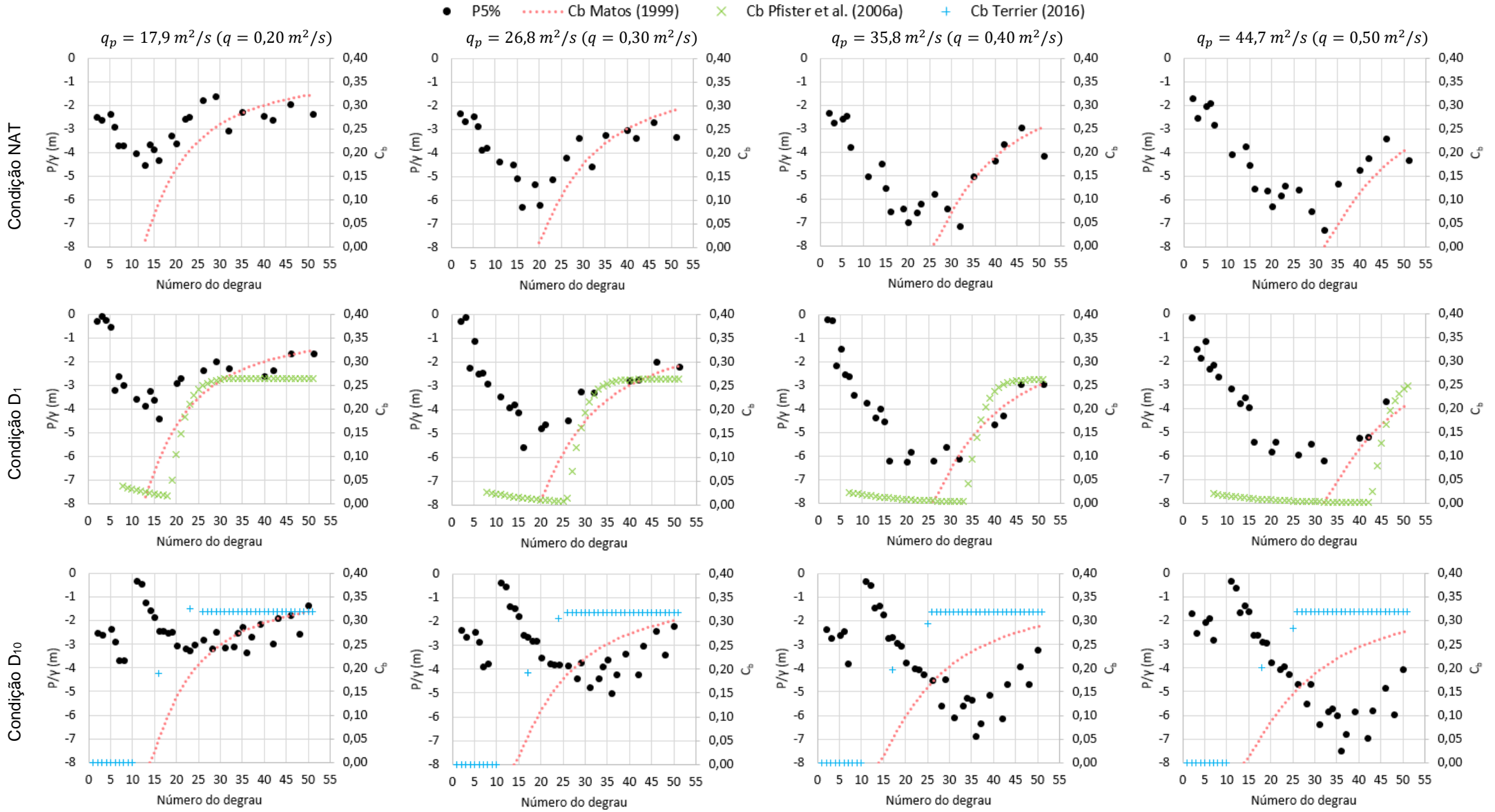


Figura 19.9 – Pressão  $P_{5\%}$  medida e concentração de ar  $C_b$  estimada ao longo da calha, nas condições NAT, D<sub>1</sub> e D<sub>10</sub>, para a escala geométrica 1:20 ( $h_d = 1,20 \text{ m}$ ).