

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

ALBA VALÉRIA BRANDÃO CANELLAS

**PRESSÕES EXTREMAS ATUANTES NAS PROXIMIDADES DAS
QUINAS DOS DEGRAUS DE VERTEDOUROS**

PORTO ALEGRE
Março de 2020

ALBA VALÉRIA BRANDÃO CANELLAS

**PRESSÕES EXTREMAS ATUANTES NAS PROXIMIDADES DAS
QUINAS DOS DEGRAUS DE VERTEDOUROS**

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

Orientador: Marcelo Giulian Marques

Coorientador: Jorge Saldanha Gonçalves
Matos

PORTO ALEGRE

Março de 2020

Canellas, Alba Valéria Brandão
PRESSÕES EXTREMAS ATUANTES NAS PROXIMIDADES DAS
QUINAS DOS DEGRAUS DE VERTEDOUROS / Alba Valéria
Brandão Canellas. -- 2020.
186 f.
Orientador: Marcelo Giulian Marques.

Coorientador: Jorge Saldanha Gonçalves Matos.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Vertedouro em degraus. 2. Pressões extremas. 3.
Esforços Hidrodinâmicos. 4. início de aeração. 5.
risco de danos por cavitação. I. Marques, Marcelo
Giulian, orient. II. Matos, Jorge Saldanha Gonçalves,
coorient. III. Título.

ALBA VALÉRIA BRANDÃO CANELLAS

**PRESSÕES EXTREMAS ATUANTES NAS PROXIMIDADES DAS QUINAS
DOS VERTEDOUROS EM DEGRAUS**

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

Aprovado em: Porto Alegre, 19 de março de 2020.

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques IPH/UFRGS
Orientador

Prof. Dr. Jorge Saldanha Gonçalves Matos IST
Co-orientador

Prof. Dr. Raul Antônio Lopardo - INA
Examinador

Prof. Dr. Carlos Barreira Martinez - UNIFEI
Examinador

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhaes Endres – IPH/UFRGS
Examinador

Este trabalho é dedicado à equipe do **Laboratório de Obras Hidráulicas - LOH da UFRGS** que atuou no Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Pré Aeração” realizado em parceria com Furnas Centrais Elétricas.

AGRADECIMENTOS

Enquanto escrevia estes agradecimentos recebi uma mensagem de uma amiga falando sobre o sentido da vida. Penso que o sentido da vida esteja em AGRADECER a todos que passam pela nossa vida e que vão tornando viver tão fascinante, embora nem sempre fácil. Agradeço a todos vocês mencionados abaixo e também àqueles que não citei, mas que tem estado presente na minha escalada.

Ao Prof. Marcelo Giulian Marques pela amizade, dedicação e infinita paciência. Minha admiração por compartilhar seu conhecimento com todos os alunos e, desta forma, ser um dos grandes responsáveis pelo prestígio que o Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS tem alcançado na comunidade acadêmica e técnica.

Ao Professor Jorge Matos pela amizade, generosidade nos aconselhamentos técnicos e incentivo para que eu persistisse no objetivo de concluir este trabalho.

À Professora Edith Beatriz Camaño pelo incentivo para que eu ousasse esta empreitada e aos Professores Luis Endres, Maurício Dai Prá, Eder Teixeira e Daniela Sanagiotto pelo apoio e participação na pesquisa que originou esta tese.

Ao Engenheiro Marcos da Rocha Botelho, gerente do Laboratório de Hidráulica de Furnas e amigo, pelo apoio a este trabalho e à pesquisa que o originou e também por sua dedicação ao laboratório e pela lisura de seus atos.

Ao Rai pela compreensão pelo tempo que passei debruçada neste trabalho e pela paciência com meu estresse nos últimos 38 anos.

À FURNAS, por ter me dado a oportunidade de crescimento profissional, e em especial à Gerência de Serviços e Suporte Tecnológico (GST.E).

Aos profissionais do Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS (LAHE) pelo apoio nesta tese e pelo trabalho na montagem do experimento e ensaios que resultaram em parte dos dados utilizados neste trabalho.

À Matheus Kunrath Oliveira e Fabiane Aquino da Silva, pela verificação e análise dos dados, pela elaboração dos gráficos e desenhos e pela formatação do texto final deste trabalho.

Aos meus pais por serem o alicerce de minha personalidade e de meus princípios e ao Roberto por sempre zelar por mim.

Aos muitos amigos, por torcerem por mim, por estarem ao meu lado nos momentos alegres e por me carregarem no colo nos momentos difíceis.

Ao Prof. Robson Sarmiento em cujas disciplinas de hidrologia e hidráulica no curso de engenharia civil da UFES fui monitora e também estagiária, pela paciência nos primeiros ensinamentos da hidráulica e pelo apoio ao me indicar tanto para o programa de mestrado como para este programa de doutorado.

MARINA e MAITÊ,

Não é sobre ter todas pessoas do mundo pra si
É sobre saber que em algum lugar alguém zela por ti
É sobre cantar e poder escutar mais do que a própria voz
É sobre dançar na chuva de vida que cai sobre nós

É saber se sentir infinito
Num universo tão vasto e bonito é saber sonhar
Então, fazer valer a pena cada verso
Daquele poema sobre acreditar

Não é sobre chegar no topo do mundo e saber que venceu
É sobre escalar e sentir que o caminho te fortaleceu
É sobre ser abrigo e também ter morada em outros corações
E assim ter amigos contigo em todas as situações

A gente não pode ter tudo
Qual seria a graça do mundo se fosse assim?
Por isso, eu prefiro sorrisos
E os presentes que a vida trouxe pra perto de mim

Não é sobre tudo que o seu dinheiro é capaz de comprar
E sim sobre cada momento sorriso a se compartilhar
Também não é sobre correr contra o tempo pra ter sempre mais
Porque quando menos se espera a vida já ficou pra trás

Segura teu filho no colo
Sorria e abraça teus pais enquanto estão aqui
Que a vida é trem-bala, parceiro
E a gente é só passageiro prestes a partir

RESUMO

A presente tese propõe uma análise estatística das pressões extremas atuantes junto às quinas dos degraus (espelho e patamar) de vertedouros para identificar a distribuição espacial dos extremos através da análise de medições feitas em três modelos físicos e a comparação com resultados obtidos por diversos autores em diferentes experimentos de laboratórios.

Foi desenvolvida uma nova abordagem visando à previsão da distribuição longitudinal das pressões extremas e a localização das mesmas na calha de vertedouros em degraus. Tendo se verificado que as pressões extremas mínimas são mais críticas nos espelhos e as extremas máximas no patamar, foram caracterizadas três posições de interesse para a estimativa das pressões extremas mínimas no espelho e duas posições de interesse para a estimativa das pressões extremas máximas no patamar. Isto permitiu a análise e estabelecimento de critérios para a verificação da possibilidade de tendência da ocorrência de cavitação nos degraus ao longo da calha (localização e vazões específicas limites).

A metodologia empregada consistiu em fazer uma análise estatística da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas e máximas nas proximidades das quinas ao longo do vertedouro em degraus com aeração natural a partir dos dados coletados em três diferentes modelos físicos (LOH I, LOH II e LAHE). Foi utilizada a pressão com estimativa de não excedência de 0,1% como pressão extrema mínima e a pressão com estimativa de não excedência de 99,9% como pressão extrema máxima. Os modelos físicos utilizados apresentam alturas de degraus de 6 cm e 9 cm e diferentes alturas de ogivas.

Os resultados foram comparados com os valores das pressões extremas obtidos por diferentes autores tendo-se verificado que os dados divergem nos valores, mas não na tendência de comportamento. As divergências nos valores possivelmente ocorrem em função das diferentes características dos modelos e de efeitos de laboratório. Entretanto, foi possível observar que os resultados da presente tese se situaram a favor da segurança, ou seja, indicando valores menores para as pressões extremas mínimas no espelho e maiores para as extremas máximas, em comparação com os resultados dos demais pesquisadores.

Foi realizado um estudo de caso utilizando a abordagem proposta onde se identificou que as vazões passíveis de risco de cavitação estão acima de 22 m³/s/m. Foi identificada também a extensão da calha sujeita a risco da ocorrência de dano cavitação.

Palavras-chave: Vertedouro em degraus, Pressões extremas, Esforços Hidrodinâmicos, início de aeração, risco de danos, cavitação.

ABSTRACT

This thesis proposes the statistical analysis of extreme pressures acting near the outer corners of spillway steps (vertical and horizontal faces), through the analysis of measurements made in three physical models and the comparison with results obtained by different authors in different laboratory experiments.

A new approach was developed to predict the longitudinal distribution of extreme pressures and their location in the spillways steps. Having verified that the minimum extreme pressures are more critical in the vertical face and the maximum extreme in the horizontal, three positions of interest were characterized for the estimation of the extreme pressures in the vertical face and two positions of interest for the estimation of the maximum extreme pressures in the horizontal face. This allowed for the analysis and establishment of criteria for verifying the possibility of a cavitation tendency on the steps along the chute (location and specific flow limits).

The methodology used consisted of making a statistical analysis of the longitudinal distribution of the minimum and maximum extreme pressures in the vicinity of the steps outer corners along the spillway with natural aeration from the data collected in three different physical models (LOH I, LOH II and LAHE). Pressure with an estimated non-exceedance of 0.1% was used as the minimum extreme pressure and pressure with an estimated non-exceedance of 99.9% as the maximum extreme pressure. The physical models used have 6 cm and 9 cm step heights and different ogive heights. The results were compared with the data obtained by different authors. It was verified that the data diverge, possibly due to the different characteristics of the models and laboratory effects. However, it was possible to observe that the results of the present thesis were in favor of safety, that is, indicating lower values for the minimum extreme pressures in the vertical face and higher for the extreme maximum, in comparison with the results of the other researchers.

A case study was carried out using the proposed approach where it was identified that the flow rates that could risk cavitation are above 22 m³/s/m. The extension of the chute subject to risk of damage due to cavitation was also identified.

Keywords: Step spillway, extreme pressures, hydrodynamic efforts, start of aeration, risk of damage, cavitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Barragem na Arkanian, Grécia (1300 a.C.): Fonte: CHANSON (2003). (b) Leonardo da Vinci, 1493-94. Codice Ms-H La scala d'acqua di Vigevano. Disponível em: < https://brunelleschi.imss.fi.it/genscheda.asp?appl=LIR&xsl=paginamanoscritto&chiave=101501 > ..30	
Figura 2 – Alterações nas áreas de impacto para $s/d_c = 0.5$ (a) $\theta = 55^\circ$ e (b) $\theta = 19$ onde s = altura do degrau, d_c = altura crítica e θ = ângulo da calha (fonte: adaptado TAKAHASHI, M. e OHTSU I (2012)).	31
Figura 3 – (a) Características macro turbulentas - início de aeração incipiente. Fonte: Sanagiotto (2003). (b) início de aeração incipiente e da aeração total a partir da visualização do escoamento. Fonte: DAIPRÁ (2004).	31
Figura 4 - Distribuição longitudinal da concentração de ar na calha de vertedouros em degraus. Fonte: MATOS (1999).	32
Figura 5 - Configurações do estudo de André (2004) e suas visualizações do padrão do escoamento. Fonte: ANDRÉ (2004)	32
Figura 6 - Aeração induzida por: (a) Pilar e (b) câmara de ar. Fonte: PRIEBE (2020).	33
Figura 7 - Cargas de pressão no degrau 24 para a vazão de protótipo $q = 10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Zona aerada. (a) espelho e (b) patamar. Fonte: TASSINARI (2020)	33
Figura 8 - Estudo detalhado sobre a construção de vertedouros de cheia em blocos pré-fabricados sobre barragens de aterro - Instituto Superior Técnico, LNEC (Cortesia do Eng. Marcelo G. Marques)	34
Figura 9 - (a) escoamento em quedas sucessivas, (b) escoamento de transição e (c) escoamento deslizando sobre turbilhões Fonte: SIMÕES et al. (2010)	35
Figura 10 - Gráfico resumo com dados de demarcações para os regimes de escoamento “Nappe Flow” (EQS) e “Skimming Flow” (EDT) propostos por diversos autores. Adaptado de: FRIZELL e FRIZELL (2015). Onde $h = h_d$ e $l = l_d$.	36
Figura 11 - Escoamento deslizando sobre turbilhões: (a) Barragem de D. Francisca - cortesia de Marcelo Giulian Marques, (b) Início de aeração incipiente. Fonte: SANAGIOTTO (2003)	37
Figura 12 – Representação esquemática do perfil longitudinal e padrão do escoamento deslizando sobre turbilhões (EDT) em vertedouros em degraus (conforme MATOS, 1999).	38
Figura 13 - Modelo LAHE - visão lateral do escoamento.	38
Figura 14 - Parâmetros utilizados nas equações da tabela 1. Fonte: adaptado de TOZZI (2004)	39
Figura 15 - Adimensionalizações para ponto de início da aeração do escoamento.	42
Figura 16 - Concentrações médias de ar a distâncias de 0,32 cm, 0,82 cm e 1,32 cm do pseudofundo (C_s), segundo modelos de MATOS (1999).	44
Figura 17 - Coeficientes de pressão média no: (a) espelho e no (b) patamar do degrau 18 do experimento de SANAGIOTTO (2003) para diferentes vazões específicas. Adaptado de: SANAGIOTTO (2003)	45
Figura 18 - Coeficientes de pressões extremas para o espelho a uma distância $0,06h$ da quina (degraus de 9 centímetros), onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d , $0,06h$ = localização da medição de pressão no espelho em relação à quina. Fonte: GOMES (2006)	50
Figura 19 - Coeficientes de pressões extremas para o patamar do degrau, onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d , $0,06l$ = localização da medição de pressão no patamar em relação à quina. Fonte: GOMES (2006)	50
Figura 20 - Coeficientes de pressões extremas para os espelhos. Fonte: OSMAR (2016)	51
Figura 21 - Coeficientes de pressões extremas para os patamares. Fonte: OSMAR (2016)	51
Figura 22 - Pressões extremas para os espelhos, onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d . Fonte: OSMAR (2016)	52

Figura 23 - Pressões extremas para os patamares, onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d . Fonte: OSMAR (2016).....	53
Figura 24 - Resistência necessária do concreto para evitar erosão por cavitação em escoamentos onde o fenômeno já se encontra estabelecido - GAL'PERIN et al. (1971).GOMES (2006)	54
Figura 25 - Influência do tempo de exposição à cavitação na profundidade da fossa de erosão, conforme o tipo de concreto empregado. - HOUGHTON et al. (1978) GOMES (2006)	55
Figura 26 - Condições propícias à cavitação incipiente em vertedouro com declividade 1V:0,75H, degraus de 0,60 m e pressões com probabilidade de 1% de não ocorrência. (Fonte OLINGER e BRIGHETTI, 2002) onde d - profundidade equivalente de água; k_s - rugosidade de forma da superfície do vertedouro	56
Figura 27 - Vistas do modelo físico LOH I.....	65
Figura 28 - Vistas do modelo físico LOH II.....	65
Figura 29 - Vistas do modelo físico LAHE.....	66
Figura 30 - Esquemas das calhas dos modelos estudados em suas respectivas escalas (h_d = altura do degrau).....	66
Figura 31 - Pontos de medição nas quinas dos degraus nos modelos LOH I, LOH II e LAHE. (unidades em mm).....	66
Figura 32 - Esquema dos parâmetros dos modelos LOH I, LOH II e LAHE apresentados na Tabela 8	68
Figura 33 - Transdutores instalados no modelo LOH I.....	70
Figura 34 - Transdutores instalados no modelo LOH II.....	71
Figura 35- Transdutores instalados no modelo LAHE.....	72
Figura 36- Ponto de início da aeração intermitente no Modelo LOH I.....	79
Figura 37 - Ponto de início da aeração total no Modelo LOH I.....	79
Figura 38 - Ponto de início da aeração intermitente no Modelo LOH II.....	79
Figura 39 - Ponto de início da aeração total Modelo no LOH II.....	79
Figura 40 - Ponto de início da aeração intermitente no Modelo LAHE.....	79
Figura 41 - Ponto de início da aeração total no Modelo LAHE.....	79
Figura 42 - Definição do início da aeração considerando a extensão da ogiva ($L_a = L_o + L_v^*$) e a posição do início da aeração a partir do início dos degraus (L_v^*).....	80
Figura 43 - Posição do início de aeração por determinação visual considerando a extensão da ogiva (L_a) em função da vazão específica (q) para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.....	81
Figura 44 - Posição do início de aeração a partir do inicio dos degraus (L_v^*) em função da vazão específica (q) para os modelos LAHE, LOH I e LOH I por determinação visual.....	84
Figura 45 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus (L_v^*) adimensionalizada em função da rugosidade (k) e do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos, LOH I, LOH II e LAHE	85
Figura 46 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus (L_v^*) adimensionalizada em função da rugosidade (k) e do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos, LOH I, LOH II e LAHE e de outros autores.	86
Figura 47: Relação da razão do início da aeração com determinação visual deste trabalho e de demais autores ($L_v^*/L_{voutros^*}$) em função do número de Froude rugoso.....	86
Figura 48 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas ($P_{99,9\%/\gamma}$) nos espelhos e patamares no modelo LOH I para $F^* = 13,06$ e $q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em relação ao início dos degraus (L_v^*).	87

- Figura 49 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas ($P_{99,9\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LOH II para $F^* = 13,06$ e $q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em relação ao início dos degraus (L^*).
..... 88
- Figura 50 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas ($P_{99,9\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LAHE para $F^* = 5,67$ e $q = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em relação ao início dos degraus (L^*).
..... 88
- Figura 51 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LOH I para $F^* = 6,53$ e $q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 89
- Figura 52 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares modelo LOH II para $F^* = 15,67$ e $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 89
- Figura 53 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LAHE para $F^* = 4,27$ e $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 90
- Figura 54 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pe0,1\%}$) e à posição relativa (s') para os modelos LOH I, LOH II e LAHE. 92
- Figura 55 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pe0,1\%}$) e à posição relativa (s'). Para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores..... 93
- Figura 56 - Valores de $C_{pe0,1\%}$ para o espelho em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos do LOH ,I LOH II e LAHE na posição $s' = 0$. Para o ponto vazado, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima. 94
- Figura 57 - Valores de mínimos de $C_{pe0,1\%}$ para o espelho em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos LOH ,I LOH II, LAHE e os resultados de outros autores. Para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima. 95
- Figura 58 - Pressões extremas com 99,9 % de não excedência junto à quina do patamar do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pp99,9\%}$) e à posição relativa (s') para os modelos LOH I, LOH II e LAHE. 95
- Figura 59 - Pressões extremas máximas com probabilidade de 99,9 % de não excedência junto à quina do patamar do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pp99,9\%}$) e à posição relativa (s') para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores. 96
- Figura 60 - Valores de $C_{p99,9\%}$ na posição $s' = 0$ para o patamar em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos LOH ,I LOH II e LAHE. Para o ponto vazado, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima. 97
- Figura 61 - Valores de $C_{p99,9\%}$ na posição $s' = 0$ para o patamar em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos LOH ,I LOH II, LAHE e modelos de outros autores. Para os pontos vazados não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima. 98
- Figura 62 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência, junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação ao emprego da altura crítica do escoamento ($P/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s'). Para os modelos LOH I, LOH II e LAHE 100
- Figura 63 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação ao emprego da altura crítica do escoamento ($P/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s') Para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores..... 101
- Figura 64 - Valores de $\zeta_{e0,1\%}$ na posição $s' = 0$ para o espelho em função do Número de Froude rugoso (F^*) para os modelos do LOH ,I LOH II e LAHE e de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima..... 101
- Figura 65 - Pressões extremas de 99,9 % de não excedência junto à quina do patamar do degrau adimensionalizada em relação a altura crítica do escoamento ($P_{p99,9\%}/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s') Para os modelos LOH I, LOH II e LAHE. 102
- Figura 66 - Pressões extremas adimensionalizada em relação à altura crítica do escoamento ($P_{p99,9\%}/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s') junto à quina do patamar do degrau com probabilidades de 99,9 % de não excedência para os modelos do LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores 103

- Figura 67 - Valores de $\zeta_{p99,9\%}$ na posição $s'=0$ para o patamar em função do Número de Froude Rugoso (F^*) para os modelos do LOH I, LOH II e LAHE e modelos de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima..... 104
- Figura 68 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH I. 106
- Figura 69 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH II. 106
- Figura 70 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LAHE. 107
- Figura 71 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até a posição de valor de mínima pressão ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) para o modelo LOH I. 107
- Figura 72 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até a posição de valor de mínima pressão ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) para o modelo LOH II. 108
- Figura 73 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas extremas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até a posição de valor de mínima pressão ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) para o modelo LAHE. 108
- Figura 74 - Comparativo do decaimento dos valores de pressão extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para os 3 modelos em função da posição na calha. 109
- Figura 75 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH I ($q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $F^* = 10,45$). 110
- Figura 76 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH II ($q = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $F^* = 20,9$). 111
- Figura 77 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LAHE ($q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $F^* = 5,68$). 111
- Figura 78 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) em função de L^* 112
- Figura 79 - Parâmetros hidráulicos e geométricos considerados na adimensionalização das pressões mínimas extremas no espelho e início dos degraus ($0; P_{i0,1\%/\gamma}$)..... 113
- Figura 80 - Adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho no início dos degraus ($0; P_{i0,1\%/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro. 113
- Figura 81 - Adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho no início dos degraus ($0; P_{i0,1\%/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores. 114
- Figura 82 - Adimensionalização das posições onde ocorrem os menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ($L_{e^*0,1\%min}$; $P_{e0,1\%min/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro. 115
- Figura 83 - Relação entre a posição adimensionalizada onde ocorrem os menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ($L_{e^*0,1\%min}$) com a posição visual (L_v^*) do início da aeração e o número de Froude rugoso. 116
- Figura 84 - Adimensionalização da posição ($L_{e^*0,1\%min/K}$) onde ocorrem os valores das menores pressões extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de menor pressão extrema mínima..... 117
- Figura 85 - Relação entre a posição adimensionalizada onde ocorrem os valores das mínimas pressões extremas mínimas no espelho considerando os dados obtidos por outros autores ($L_{e^*0,1\%min/k}$)_{outros} e aqueles do presente estudo ($L_{e^*0,1\%min/k}$) em função do número de Froude rugoso. 118
- Figura 86 - Adimensionalização dos menores valores das pressões extremas mínimas no espelho $P_{e0,1\%min}$ e $Z_{0,1\%min}$ em função do número de Froude rugoso do vertedouro para os modelos LOH I, LOH II e LAHE. 119
- Figura 87 - Adimensionalização dos valores mínimos de pressões extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros

- autores. Para os pontos vazados, não se tem a certeza que o escoamento alcançou o ponto de pressão extrema mínima..... 120
- Figura 88 - Adimensionalização da posição do ponto ($L_e^* n$) onde a pressão extrema mínima passa a ser constante ($P_{n0,1\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro. Para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de pressão constante para as extremas mínimas..... 121
- Figura 89 -- Adimensionalização da posição do ponto ($L_e^* n$) onde a pressão extrema mínima passa a ser constante ($P_{n0,1\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro. Para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de pressão constante para as extremas mínimas..... 122
- Figura 90 - Comparativo entre as equações das posições características adimensionalizadas (L_v^*), ($L_e^*_{0,1\%min}$) e (L_{en}^*) em função do número de Froude rugoso do vertedouro..... 123
- Figura 91 - Adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho onde a mesma passa a ser constante ($P_{en0,1\%}/\gamma$) pela altura crítica, em função do número de Froude rugoso do vertedouro. 124
- Figura 92 - Adimensionalização das pressões mínimas extremas no espelho dos degraus onde a mesma passa a ser constante ($P_{en0,1\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores..... 125
- Figura 93 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) para o modelo LOH I em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*)..... 126
- Figura 94 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) para o modelo LOH II em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*)..... 126
- Figura 95 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) para o modelo LAHE em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*)..... 127
- Figura 96 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*) para o modelo LOH I; Froude rugoso de 10,45 ($q = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)..... 127
- Figura 97 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p099,9\%}/\gamma$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*) para o modelo LOH II; Froude rugoso de 10,45 ($q = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)..... 128
- Figura 98 - -- Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*) para o modelo LAHE; Froude rugoso de 7,82 ($q = 0,275 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$)..... 128
- Figura 99: Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões máximas extremas ($P_{pn99,9\%}/\gamma$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*). 129
- Figura 100 - Adimensionalização das pressões extremas máximas no patamar no início dos degraus ($0; P_{ip99,9\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro para os dados dos três modelos. 130
- Figura 101 - Adimensionalização das pressões extremas máximas no patamar e início dos degraus ($0; P_{ip99,9\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores. 131
- Figura 102 - Adimensionalização dos valores das maiores pressões extremas máximas no patamar pela carga a montante ($Z_{0,1\%min}$), altura do degrau (h_d) e altura crítica (h_c) $P_{pn99,9\%max} \gamma Z_{0,1\%min} h_d h_c$ em função do número de Froude rugoso do vertedouro. 132
- Figura 103 - Adimensionalização dos valores das maiores pressões extremas máximas no patamar pela carga a montante ($Z_{pn99,9\%}$), altura do degrau (h_d) e altura crítica (h_c) em função do número de Froude rugoso do vertedouro para outros autores. 133
- Figura 104 – Parâmetros da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas e máximas nos espelhos e patamares e da concentração de ar junto ao fundo e média no escoamento..... 135

- Figura 105 - Características geométricas do vertedouro em degraus onde foram aplicadas as equações de previsão das pressões extremas..... 138
- Figura 106 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $5\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 8,7$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura..... 140
- Figura 107 - Distribuição longitudinal das pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $10\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 16,5$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e declividade 1V:0,75H. 141
- Figura 108 - Distribuição longitudinal das pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $15\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 33,1$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e declividade 1V:0,75H. 141
- Figura 109 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $20\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 24,8$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e declividade 1V:0,75H. 142
- Figura 110 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $22\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 24,8$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e declividade 1V:0,75H. 142
- Figura 111 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $25\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 41,3$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e declividade 1V:0,75H. 143
- Figura 112 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $30\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 49,6$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura e e declividade 1V:0,75H. 143
- Figura 113 - Extensão em número de degraus com risco potencial de danos em função da vazão específica vertida..... 144
- Figura 114 - Distribuição longitudinal da pressões máximas extremas no patamar para as vazões calculadas para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura..... 146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Equações sugeridas por diversos autores para posição de início da aeração.....	40
Tabela 2 – Valores dos coeficientes a, b, c para a estimativa da concentração média de ar a alturas de $Y_1 = 0,32$ cm; $Y_2 = 0,82$ cm e $Y_3 = 1,32$ cm do pseudo-fundo (da quina do degrau).....	44
Tabela 3 – Características dos experimentos de AMADOR (2005), GOMES (2006) e OSMAR (2016).	46
Tabela 4 - Parâmetros do modelo de previsão de pressões desenvolvido por AMADOR (2005).	47
Tabela 5 - Alguns limites de velocidade s a partir da qual há risco de cavitação em superfícies de concreto definidos por diversos pesquisadores.....	57
Tabela 6 - Alguns limites de vazão específica propostos por pesquisadores	57
Tabela 7 – Números de Reynolds e de Weber limites para evitar significantes efeitos de escala em modelos físicos de acordo com diferentes autores. (fonte: adaptado de PFISTER e HAGER, 2010, PFISTER e CHANSON, 2014 e TERRIER 2016).....	61
Tabela 8 - Características dos modelos físicos (ver Figura 31 e Figura 32).....	67
Tabela 9 - Vazões específicas em cada modelo e os seus números de Froude rugosos (F^*).....	68
Tabela 10– Principais características das amostras adquiridas nos modelos.....	69
Tabela 11- Características consideradas para verificação da influência da rugosidade do degrau no desenvolvimento da camada limite.	82
Tabela 12 - Determinação dos pontos característicos do escoamento em um vertedouro em degrau	136
Tabela 13- Características geométricas do vertedouro em degraus onde foram aplicadas as equações de previsão das pressões extremas.....	138
Tabela 14- Extensão do risco potencial de danos nos degraus	140
Tabela 15– Características dos pontos de interesse (pressão, carga a montante e Posição).	145
Tabela 16- Relações entre as pressões, posições e carga a montante.	145
Tabela 17 Relação entre a pressão máxima no patamar e a carga a montante em relação à posição de início de aeração no espelho.....	147

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
A_d	Coeficiente de assimetria	-
B	Largura do vertedouro	(m)
C	Concentração de ar em um escoamento deslizante sobre turbilhões com aeração completamente desenvolvida	-
C_m	Concentração média do ar na seção	-
C_s	Concentração média de ar afastada do pseudo-fundo	-
C_T	Concentração de ar total	-
C_{pa}	Coeficiente de pressão extrema	-
C_{p_m}	Coeficiente de pressão média	-
C_{σ_p}	Coeficiente de pressão flutuante com base no desvio amostral	-
$C_{P\ 0,1\%}$	Coeficiente de pressão com 0,1% de não excedência	-
$C_{P99,9\%}$	Coeficiente de pressão com 99,9% de não excedência	-
$C_{P0,1\%min}$	Coeficiente de pressão mínimo para as pressões com 0,1 % de probabilidade de não excedência	-
$C_{Pe0,1\%}$	Coeficiente de pressão no espelho para as pressões com 0,1 % de probabilidade de não excedência	-
$C_{Pe0,1\%min}$	Menor valor do coeficiente de pressão das extremas mínimas para os espelhos	-
$C_{pp99,9\%}$	Coeficiente de pressão no patamar para as pressões com 99,9 % de probabilidade de não excedência	-
$C_{Pp99,9\%max}$	Coeficiente de pressão no patamar para as pressões extremas máximas	-
$C_{P_x\%}$	Coeficiente de pressão com x% de probabilidade de não ser excedido	-
d_L	Hipotenusa do degrau	(m)
F^*	Número de Froude rugoso	-
Fr	Número de Froude	-
Fr_{Lref}	Número de Froude de referência	-

f_a	Frequência de aquisição	-
f_d	Frequência dominante	(Hz)
h_c, d_c	Altura crítica	(m)
g	Aceleração da gravidade	(m/s ²)
h_d	Altura do degrau	(m)
h_o	Espessura da lâmina de água no fim da ogiva	(m)
h	Espessura da lâmina d'água no ponto considerado	(m)
h_a	Espessura da lâmina d'água na seção de afloramento da camada limite	(m)
h_n	Espessura da lâmina d'água no ponto a partir do qual a pressão mínima no espelho com probabilidade de não excedência de 0,1% passa a oscilar em torno de um valor médio.	(m)
h_t	Distância a partir da base do patamar até a quina do espelho	(m)
h_t/h_d	Posição relativa da tomada no espelho	-
H_v	Altura do vertedouro	(m)
k	Rugosidade do degrau	(m)
K_o	Rugosidade da superfície da ogiva	(m)
K_s	Rugosidade da superfície	(m)
K_u	Coefficiente de curtose	(m.c.a.)
L	Posição ao longo da calha medida a partir da crista do vertedouro	(m)
L^*	Comprimento sobre a calha a partir do início dos degraus.	(m)
L_v	Comprimento do início de aeração (visual) sobre a calha a partir da crista do vertedouro.	(m)
L_v^*	Comprimento do início de aeração (visual) sobre a calha a partir do início dos degraus.	(m)
$L_{en^{0,1\%}}$	Posição a partir do início dos degraus onde ocorre a pressão extrema no espelho passa a oscilar em torno de um valor médio ($P_{en^{0,1\%}}/\gamma$)	(m)
$L_{e^{0,1\%}min}^*$	Posição a partir do início dos degraus onde ocorre a menor pressão extrema no espelho ($P_{e^{0,1\%}min}/\gamma$)	(m)
L_n	Ponto de aeração total	(m)

L_n^*	Posição onde as pressões passam a ser praticamente constantes	(m)
L_a	Posição de início da aeração considerando a extensão da ogiva lisa (L_o)	(m)
L_{jet}	Comprimento do jato	(m)
l_d	Base do degrau	(m)
L_o	Comprimento da ogiva	(m)
$L_{P0,01\%/min}$	Posição onde ocorre o mínimo ($P_{e0,1\%/min}/\gamma$).	(m)
$L_{a;C=0,01}$	Ponto de início da aeração onde a concentração Média de ar no pseudo-fundo é 0,01	(m)
L_{ref}	Comprimento de referência	(m)
l_t	Distância a partir da parte inferior do espelho até a quina do patamar	(m)
l_t / l_d	Posição relativa da tomada no patamar ⁴	-
$L_{e^*0,1\%/min}$	Posição de pressão mínima no espelho com probabilidade de não excedência de 0,1% a partir do primeiro degrau	(m)
$L_{e_n}^*$	Posição onde a pressão extrema mínima passa a ser constante	(m)
m	Declividade da calha (1V:mH)	-
N_d	Número de degraus	(m)
P/γ	Pressão	(m)
$P_{x\%/}\gamma$	Pressão com probabilidade X% de ser inferior ou igual	(m)
$P_{0,1\%/}\gamma$	Pressão com probabilidade de 0,1% de não excedência	(m.c.a.)
$P_{99,9\%/}\gamma$	Pressão com probabilidade de 99,9% de não excedência	(m.c.a.)
$P_{e0,1\%/}\gamma$	Pressão com probabilidade de 0,1% de não excedência no espelho	(m.c.a.)
$P_{e0,1\%/min}/\gamma$	Pressão mínima entre as extremas mínimas no espelho com probabilidade de 0,1% de não excedência no espelho	(m.c.a.)
$P_{ei0,1\%/}\gamma$	Pressão extrema mínima no espelho com probabilidade de 0,1% de não excedência no início da calha em degraus	(m.c.a.)
$P_{en0,1\%/}\gamma$	Valor da Pressão mínima no espelho no ponto onde as pressões passam a oscilar em torno de um valor médio com probabilidade de 0,1% de não excedência	(m.c.a.)
P_m/γ	Pressão média junto a quina dos degraus	(m.c.a.)

$P_{p99,9\%/\gamma}$	Pressão extrema máxima no patamar com probabilidade de 99,9% de não excedência	(m.c.a.)
$P_{p99,9\%max/\gamma}$	Maior pressão extrema máxima que ocorre no patamar com probabilidade de 99,9% de não excedência	(m.c.a.)
$P_{pi99,9\%/\gamma}$	Pressão extrema máxima que ocorre no patamar no início da calha em degraus com probabilidade de 99,9% de não excedência	(m.c.a.)
$P_{pn99,9\%max/\gamma}$	Pressão extrema máxima que ocorre no patamar no ponto onde as pressões passam a oscilar em torno de um valor médio com probabilidade de 99,9% de não excedência	(m.c.a.)
$P_{vapor/\gamma}$	Pressão de vapor	(m.c.a.)
Q	Vazão do modelo	(m ³ /s)
q	Vazão específica	(m ³ s/m)
q _{LAHE}	Vazão específica modelo LAHE	(m ³ /s/m)
q _{LOHI}	Vazão específica modelo LOH I	(m ³ /s/m)
q _{LOHII}	Vazão específica modelo LOH II	(m ³ /3/m)
q _a	Vazão específica de ar	(m ³ /s/m)
q _w	Vazão específica de água	(m ³ /s/m)
R	Coefficiente de correlação	-
Re, Ro	Número de Reynolds	-
Rc	Número de Reynolds modificado por Chanson	-
Rd	Resultante dos esforços junto às quinas	(m.c.a.)
Re _{Lref}	Números de Reynolds de referência	-
s'	Coefficiente de posição adimensional com valor 0 no ponto de início da aeração $s' = \frac{L+La}{h_a}$	-
t _a	Tempo de aquisição	(s)
v _a	Velocidade média no início da aeração	(m/s)
v	Velocidade característica (de referência)	(m/s)
V _m , V _{am}	Velocidade média do escoamento na seção	(m/s)
X	Distância na ogiva até o ponto de determinação de δ	(m)
X%	Índice da pressão que pode ser: * 99,9 % de ser inferior a um valor ($P_{99,9\%/\gamma}$)	-

	* 0,1 % de ser inferior a um valor ($P_{0,1\%}/\gamma$)	
y_j	Altura da ogiva a jusante	(m)
y_m	Altura da ogiva a montante	(m)
Y_t	Altura do vertedouro (ogiva)	(m)
Y_1	Altura em relação ao pseudo fundo	(cm)
Y_{90}	Profundidade característica do escoamento onde a concentração média do ar é 90%.	-
z'	Diferença entre cotas da crista do vertedouro e a altura média do degrau no qual se observa o início da aeração	(m)
Z_a	Carga a montante no ponto de início da aeração	
Z_v	Altura total dos degraus	(m)
$Z_{0,1\%min}$	Carga a montante em relação a posição vertical onde ocorre a menor pressão extrema mínima ($\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma}$)	(m)
Z_i	Carga a montante em relação a posição vertical do início dos degraus	(m)
Z_n	Carga a montante em relação a posição vertical a partir da qual a pressão passa a ser praticamente constante.	(m)
We_{Lref}	Números de Weber de referência	-
We, W_o	Números de Weber	-

LETRAS GREGAS

Símbolo	Descrição	Unidade
α	Declividade da calha	o
β	Relação vazão de ar (qa) com a vazão de água (qw)	-
λ	Escala	-
$\zeta_{p,x\%}$	Adimensional de pressão $\zeta_{p,x\%} = \frac{P_x}{h_c}$	-
$\zeta_{e,0,1\%}$	Adimensional de pressão das extremas mínimas no espelho	-
$\zeta_{e,0,1\%min}$	Menor valor de $\zeta_{e,0,1\%}$	-
$\zeta_{p,99,9\%max}$	Maior valor de $\zeta_{p,99,9\%}$	-
$\zeta_{p,99,9\%}$	Adimensional de pressão das extremas máximas no patamar	-
δ	Espessura da camada limite no ponto x	(m)
σ	Desvio padrão da amostra de pressão	(m.c.a.)
σ_w	Tensão superficial entre ar e água	N/m
γ	Peso específico da água	N/m ³
β	Coefficiente de concentração de ar	-
ν	Viscosidade cinemática da água	m ² /s
μ	Viscosidade dinâmica da água	m ² /s
ρ	Massa específica da água	Kg/m ³

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
2	DIRETRIZES DA PESQUISA	27
2.1	Questões da pesquisa	27
2.2	Objetivos do trabalho	27
2.2.1	Objetivo principal	28
2.2.2	Objetivos secundários	28
2.3	Premissa	29
2.4	Delimitações	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL	30
3.1	Considerações gerais	30
3.2	Características gerais do escoamento sobre vertedouros em degraus	34
3.2.1	Tipos de escoamento	34
3.2.2	Escoamento Deslizante sobre Turbilhões (EDT)	36
3.3	Posição de Início da Aeração	39
3.4	Aeração do Escoamento	42
3.5	Distribuição da pressão ao longo da calha.	45
3.6	Limitação do escoamento – danos por cavitação	53
3.7	Efeito de escala	58
4	METODOLOGIA	64
4.1	Aquisição e análise de dados nos modelos em operação LOH I, LOH II e LAHE	64
4.1.1	Características gerais dos modelos	64
4.1.2	Coleta de Dados de Pressões	69
4.1.2.1	Medições com transdutores de pressão no LOH I	70
4.1.2.2	Medições com transdutores de pressão no LOH II	71
4.1.2.3	Medições com transdutores de pressão no LAHE	71
4.2	Busca na literatura por dados de outros autores	72
4.3	Considerações sobre os modelos físicos utilizados	74
4.4	Considerações gerais sobre as pressões analisadas	74
5	ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MACRO TURBULENTAS	78
5.1	Análise Visual da Posição de Início de Aeração	78
5.2	Análise dos dados de pressões extremas junto às quinas dos degraus nos modelos LOH I, LOH II e LAHE	87
5.2.1	Identificação onde as pressões extremas são mais críticas.	87
5.2.2	Análise das pressões extremas da forma tradicional através do coeficiente de pressão (C_p) e adimensional de localização (s')	90
5.2.3	Pressões adimensionalizadas pela altura crítica do escoamento (h_c) nas quinas dos degraus e adimensional de localização (s')	98

5.2.4	Proposta de uma nova abordagem para análise das pressões extremas	104
5.2.4.1	Definição dos pontos característicos da distribuição de pressões extremas mínimas no espelho.....	110
5.2.4.1.1	Pressão no início dos degraus → definida pelas coordenadas (0; $P_{e_{i0,1\%}/\gamma}$).....	112
5.2.4.1.2	Posição de menor pressão extrema mínima ($L^*_{e0,1\%min}$; $P_{e0,1\%min/\gamma}$).....	114
5.2.4.1.3	Posição onde a pressão extrema mínima passa a ser constante (L^*_{en} ; $P_{en0,1\%/\gamma}$). 120	
5.2.4.2	Definição dos pontos característicos da distribuição de pressões extremas máximas no patamar.....	125
5.2.4.2.1	Posição inicial de pressão máxima definida pelas coordenadas (0; $P_{pi99,9\%/\gamma}$).....	129
5.2.4.2.2	Posição da maior pressão extrema máxima ($L^*_{e0,1\%min}$; $P_{pn99,9\%max/\gamma}$).....	131
6	DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MACROTUBULENTAS DO ESCOAMENTO	134
7	APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PREVISÃO DAS PRESSÕES EM UM ESTUDO DE CASO	137
7.1	Estimativas das pressões mínimas extremas junto aos espelhos ($P_{e0,1\%/\gamma}$) e suas localizações.....	139
7.2	Estimativas das pressões máximas extremas junto aos patamares ($P_{p99,9\%/\gamma}$) e suas localizações.....	146
8	CONCLUSÃO FINAL	148
9	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	152
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	154
11	ANEXOS	165
11.1	Anexo A – Posição dos degraus com medição LOH I.	165
11.2	Anexo B – Posição dos degraus com medição LOH II. não confere com tabela do Anexo D	166
11.3	Anexo C – Posição dos degraus com medição LAHE.	166
11.4	Anexo D Características do modelos de SANAGIOTTO (2003), CONTERATO (2011), DAI PRÁ (2004), AMADOR (2005) e dos modelo LAHE, LOH I E LOH II.....	167
11.5	Anexo E – Posição dos L_a , L_v^*	172
11.6	Anexo F	173
11.6.1	Pressões nas posições de interesse no espelho $P_{ei0,1\%}$ (Primeiro Degrau)	173
11.6.2	Pressões nas posições de interesse no patamar Patamar $P_{pi99,9\%}$ (Primeiro Degrau) .	176
11.6.3	Pressões nos três modelos–ESPELHO.....	178
11.6.4	Pressões nos três modelos - PATAMAR	182
11.7	Anexo G – Equações para o cálculo da concentração pontual de ar segundo os autores	186

1 INTRODUÇÃO

Canais e calhas vertentes com degraus vêm sendo utilizados pela humanidade há aproximadamente 3000 anos (CHANSON, 1994).

A partir da década de 70, em função da utilização de novas técnicas de construção (Concreto Compactado com Rolo - CCR, gabiões), aumentou o interesse pelos canais escalonados e vertedouros em degraus. Isso foi associado ao aumento do número de barragens que tiveram seu sistema extravasor com este tipo de estrutura. Conforme AMADOR et al. (2004) naquele ano estimava-se que mais de 30% das barragens construídas em CCR possuíam vertedouros em degraus. No Brasil, o uso de concreto compactado com rolo para a construção de barragens com vertedouros em degraus tem sido uma prática há mais de quarenta anos. Conforme SIMÕES (2008), Associação Brasileira de Cimento Portland e ANDRIOLO (2002), entre 2002 e 2006 existia um número superior a 150 barragens com vertedouros em degraus no Brasil. A altura dos degraus varia entre 30 cm e 60 cm, sendo que a maioria possui degrau de 60 cm.

Um dos atrativos para o uso de degraus ao longo do perfil da calha do vertedouro é possibilitar uma maior dissipação da energia do escoamento durante a queda em relação a um vertedouro convencional com calha lisa. A dissipação máxima de energia em um vertedouro em degraus ocorre quando o escoamento ao longo da calha passa pelo ponto de aeração total (L_n) atingindo um regime “uniforme”. Nesse caso, a dissipação de energia ao longo de um vertedouro em degraus pode resultar em uma redução de até 80% da energia total a montante, dependendo das condições geométricas e hidráulicas (SANAGIOTTO (2003)). Para condições hidráulicas similares, o vertedouro com calha lisa promove dissipação inferior a 5% da energia total a montante do mesmo (PETERKA (1953)).

Este fato faz com que as estruturas de dissipação a jusante dos vertedouros em degraus possam ter menor comprimento e cota de fundo mais elevada, resultando em estruturas mais econômicas quando comparadas com às estruturas de dissipação a jusante de vertedouros com calha lisa reduzindo os custos das obras (volumes de escavação e de concreto).

Em função das vantagens relacionadas aos vertedouros em degraus (construtivas e econômicas), as características dos escoamentos sobre os mesmos

têm sido estudadas em diversas instituições em muitos países do mundo (África do Sul, Austrália, Suíça, Brasil, Canadá, China, Espanha, Estados Unidos, Grécia, Japão, Portugal entre outros). A maioria destes trabalhos vem sendo feita em modelos experimentais devido à complexidade das características do escoamento (bifásico com descolamento) e com os seguintes enfoques preferenciais:

- Características macroturbulentas do escoamento relacionados à: região do início da aeração, processo de aeração ao longo da calha, energia dissipada pelos degraus e energia residual no pé da estrutura Pesquisadores: SORENSEN (1985), CHANSON (1994), PEGRAM et al. (1999), CHAMANI e RAJARATNAM (1999), MATOS (1999), CHANSON (2002), BOES e HAGER (2003), SANAGIOTTO (2003), DAI PRÁ (2004), GONZALEZ e CHANSON (2007), AMADOR (2005), CONTERATO (2011), MEIRELES et al. (2012), HUNT et al. (2014) entre outros.
- Processo de aeração ao longo da calha: CHANSON (1994b), MATOS (1999), FRIZELL et al. (2013), MATOS e MEIRELES (2014), CHANSON (2015) entre outros.
- Aspectos das pressões nos degraus para definição de regiões de baixa pressão que possibilitam a ocorrência do fenômeno de cavitação ao longo da calha do vertedouro: TOZZI (1992), AMADOR et al. (2004), SANAGIOTTO (2003), DAI PRÁ (2004), GOMES (2006), AMADOR et al. (2009), entre outros.

Nas três últimas décadas diversos modelos físicos foram construídos e vários padrões de escoamento foram observados bem como a sua complexidade em função de se tratar de um escoamento aerado (bifásico). Pode-se citar os seguintes autores, TOZZI (1992), CHANSON (1993), OHTSU, I. e YASUDA, (1997), MATOS (1999), POVH (2000), CHANSON; YASUDA; OHTSU, (2002); CHEN; DAI; LIU, (2002), BOES e HAGER (2003), SANAGIOTTO (2003) e DAI PRÁ (2004), MEIRELES (2004), AMADOR (2005), GOMES (2006), SIMÕES; SCHULZ; PORTO, (2010), FRIZELL et al (2013), FRIZELL e FRIZELL, (2015) , TABARI; TAVAKOLI, 2016, ZHANG; CHANSON (2016), OSMAR (2016), TERRIER (2016) entre muitos outros.

Em função dos estudos desenvolvidos se tem o seguinte consenso:

- Os degraus aumentam a turbulência do escoamento fazendo com que o ponto de afloramento da camada limite (L_a), após o qual se inicia a aeração

do escoamento, ocorra mais a montante do que em escoamentos em vertedouros com calha lisa.

- A jusante do afloramento da camada limite (L_a) a aeração natural protege a calha do vertedouro de danos provocados pela cavitação. Entretanto, a montante deste ponto os vertedouros em degraus são potencialmente mais expostos à cavitação do que os vertedouros com calhas lisas devido à separação do escoamento provocada pelos degraus combinada com a ocorrência de baixas pressões (VOLKART (1984) apud TERRIER (2016)).

Ainda não é um consenso:

- A carga hidráulica máxima a montante da crista de vertedouros em degraus que não provoca danos nos degraus:
 - * Para TOZZI (1992), GOMES (2006), AMADOR (2005), entre outros, se situa em torno de 3,0 a 3,5m.
 - * Para BOES e HAGER (2003) se situa entre 5,5 e 6,0 m.
- A vazão específica máxima admissível, para que não ocorra cavitação na calha do vertedouro em degraus. Para TOZZI (1992), GOMES (2006), AMADOR (2005), entre outros está limitada entre ≈ 10 e $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.
- As vazões específicas que podem provocar danos por cavitação:
 - * Para TOZZI (1992), GOMES (2006), AMADOR (2005), entre outros, são superiores a $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.
 - * Para MATOS et al. (2001) e BOES e HAGER (2003) as vazões devem ser superiores a $25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Poucos estudos realizados analisam os efeitos da pressão nas quinas dos degraus, sendo possível citar: SANAGIOTTO (2003), DAI PRÁ (2004), SÁNCHEZ (2001), AMADOR (2005), GOMES (2006), AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ (2009), CONTERATO (2011), OSMAR (2016). Entretanto, ainda não existe um consenso sobre como se dá a distribuição longitudinal das pressões junto às quinas dos degraus.

Atualmente há uma tendência de se estudar os vertedouros em degraus com um sistema de pré-aeração no escoamento através da inclusão de alterações na geometria do perfil do vertedouro de maneira a injetar ar no escoamento. Isto visa

proteger a superfície do concreto e permitir uma maior vazão específica sem ocasionar danos.

Nesta linha pode-se citar os estudos feitos por PFISTER et al. (2006), PFISTER e HAGER (2010), e TERRIER (2016), que procuraram analisar o comportamento do escoamento com pré-aeração. Esses estudos indicam que a pré-aeração pode trazer benefícios ao escoamento quanto à redução do risco de cavitação, mas ainda não há um consenso sobre a forma mais eficiente de realizar esta aeração. Com exceção de TERRIER (2016), estes estudos não foram feitos com análise das pressões nas quinas dos degraus, o que permite analisar de forma direta os esforços positivos e negativos aos quais os degraus estão submetidos em seus pontos mais críticos. A maioria dos autores supramencionados realizou somente a medição de ar no escoamento.

É importante que se conheça a distribuição longitudinal das pressões junto às quinas dos degraus (patamar e espelho) na situação com aeração natural para se analisar o potencial de risco de danos ocasionado pelo escoamento. Acredita-se que este conhecimento permitirá uma maior segurança na definição das vazões específicas limites para que não ocorram danos por cavitação. Além de permitir a comparação com soluções com a inclusão de aeração induzida visando o aumento das vazões específicas a serem utilizadas nas estruturas sem o risco de danos.

Basicamente, a relevância do presente estudo é sustentada pela ausência de um consenso quanto a:

- Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas e máximas que podem ocorrer junto às quinas dos degraus.
- Identificação de limites relacionados a fenômenos de erosão/cavitação que podem ocasionar danos na superfície do concreto.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Este trabalho faz parte da linha de pesquisa que vêm sendo desenvolvida pelo Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) de Furnas Centrais Elétricas S.A. na área de esforços hidrodinâmicos provocados pelo escoamento em estruturas de dissipação de energia. O mesmo contempla a etapa de análise da distribuição longitudinal das pressões nas quinas dos degraus em escoamentos com aeração natural e está inserido no projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) “ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO FORÇADA (Pré Aeração ou Aeração Induzida)” onde o laboratório de hidráulica experimental de Furnas atua em parceria com o Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A pesquisa foi submetida à ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) em 2015 com conclusão prevista até maio de 2020. A autora é coordenadora e pesquisadora no referido projeto de pesquisa e desenvolvimento.

2.1 Questões da pesquisa

A partir da análise estatística das pressões extremas atuantes junto às quinas dos degraus (espelho e patamar) de um vertedouro é possível determinar:

- a) As características macroturbulentas do escoamento sobre o vertedouro em degraus, tais como posição de início da aeração e a posição de início do escoamento uniforme.
- b) Os esforços extremos atuantes no espelho e no patamar.
- c) A vazão específica a partir de qual ocorre cavitação ao longo da calha.
- d) Quais os trechos/degraus que estariam sujeitos a danos (erosão/cavitação) ao longo da calha.
- e) Uma metodologia que possa prever as pressões extremas junto às quinas dos degraus nos espelhos e nos patamares.

2.2 Objetivos do trabalho

O objetivo do presente trabalho é estudar os fenômenos envolvidos no escoamento em vertedouro em degraus, utilizando como ferramenta a análise da distribuição longitudinal das pressões extremas atuantes junto às quinas dos degraus (espelho e patamar), através da análise estatística das amostras obtidas em ensaios experimentais feitos em três modelos de laboratório e comparar os resultados com os

obtidos por diversos autores em diferentes experimentos de laboratórios. Os objetivos do trabalho estão classificados em principal e secundário e serão apresentados na sequência.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo principal desta tese de doutorado é desenvolver processos e metodologias de análise dos dados experimentais de pressão extrema ao longo da calha do vertedouro em degraus visando contribuir para o estabelecimento de critérios para o dimensionamento dessas estruturas, além de verificar o risco de erosão/cavitação, estimando as pressões atuantes junto às quinas dos degraus (espelho e patamar) ao longo da calha (determinando a posição e o valor das pressões) em função de vazões específicas.

2.2.2 Objetivos secundários

Para alcançar o objetivo principal foi necessário atingir objetivos secundários para identificar as características do escoamento através da medição de pressões nas quinas dos degraus do vertedouro. Os objetivos secundários foram:

- a) Atualização da bibliografia;
- b) Análise dos dados de pressões junto às quinas dos degraus (patamar e espelho) coletados:
 - Por diferentes autores CONTERATO (2011), SÁNCHEZ (2001), AMADOR (2005), SANAGIOTTO (2003), DAI PRÁ (2004), GOMES (2006).
 - Em três modelos de vertedouros em degraus do projeto de P&D supramencionado:
 - * um modelo existente no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas Centrais Elétricas S.A. (modelo LAHE) e
 - * dois modelos existentes no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (modelos LOH I e LOH II).
- c) Análise estatística da distribuição longitudinal dos dados de pressões atuantes junto às quinas dos degraus (patamar e espelho) avaliando pressões extremas.
- d) Definição das pressões extremas junto às quinas dos degraus (patamar e espelho) ao longo da calha com probabilidade de não excedência.

- e) Definição de parâmetros adimensionais de maneira a generalizar os resultados e permitir a previsão dos valores de pressão ao longo da calha em degraus de estruturas com características geométricas diversas.
- f) Definição das posições de início da aeração, das vazões e das pressões críticas ao longo da calha que possam vir a provocar cavitação nos degraus com a finalidade de gerar subsídios para o dimensionamento da proteção dos mesmos.

2.3 Premissa

O trabalho tem por premissa que, sendo a região próxima às quinas dos degraus dos vertedouros a região mais crítica do ponto de vista de possíveis danos ao concreto, esta é a área sobre a qual devem ser avaliados criteriosamente os esforços de pressões extremas produzidos pelo escoamento.

2.4 Delimitações

O trabalho delimita-se ao estudo das pressões no espelho e no patamar, junto às quinas dos degraus com aeração natural em calhas com declividade de 1,00(V):0,75(H) e alturas do degrau (h_d) de 6 cm e 9 cm, com vazões específicas (q) não superiores a 0,45 m³/s/m. Os dados foram adquiridos nos três modelos indicados anteriormente.

As análises dos dados bibliográficos ampliam estas condições para degraus com alturas entre 5 e 10 cm (em experimento), vazões específicas máximas de 0,7 m³/s/m e calhas com altura máxima de 4,5m.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO NATURAL

3.1 Considerações gerais

Neste item será apresentada uma revisão da literatura que engloba diversos assuntos referentes ao escoamento sobre vertedouros em degraus com foco principal nas considerações sobre os temas mais pertinentes à caracterização do campo de pressões em escoamentos deslizantes sobre turbilhões (EDT) com aeração natural. Também serão abordados assuntos gerais sobre as características macroturbulentas do escoamento tais como posição de início da aeração incipiente e da aeração total.

Nas últimas décadas muito se tem estudado sobre vertedouros em degraus. A revisão bibliográfica aqui apresentada não pretende englobar detalhadamente todos os estudos já realizados referentes ao tema.

Para assuntos específicos se recomenda a consulta aos seguintes trabalhos:

- Histórico de utilização de vertedouros em degraus (Figura 1), CHANSON (1994), CHANSON (1995), RENA (2004) apud GOMES (2006), SIMÕES (2008) entre outros.



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Barragem na Arkananian, Grécia (1300 a.C.): Fonte: CHANSON (2003). (b) Leonardo da Vinci, 1493-94. Codice Ms-H La scala d'acqua di Vigevano. Disponível em: <<https://brunelleschi.imss.fi.it/genscheda.asp?appl=LIR&xsl=paginamanoscritto&chiave=101501>>

- Desenvolvimento tecnológico no estudo sobre vertedouros em degraus (Figura 2): FRIZELL e MELFORD (1991), CHANSON (1994), SANAGIOTTO (2003), DAI PRÁ (2004) TAKAHASHI, M. e OHTSU I (2012), PRIEBE (2020) entre outros.

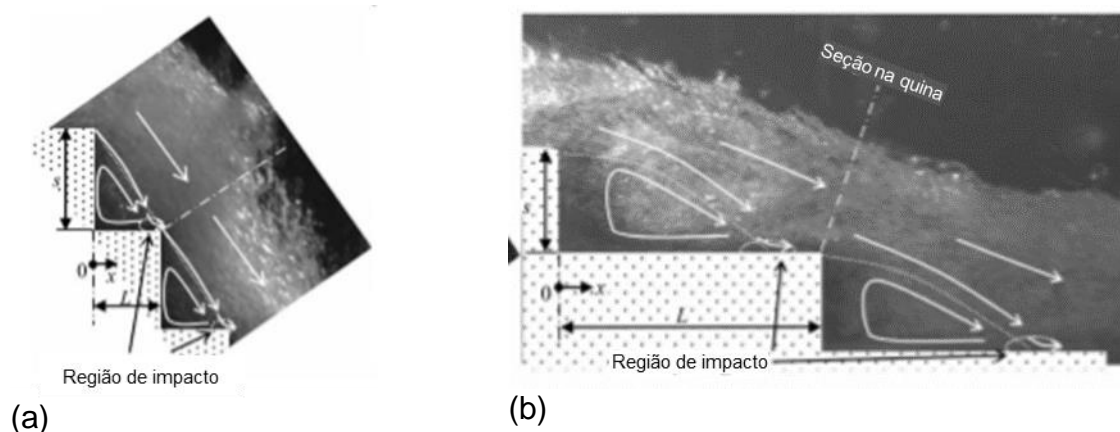


Figura 2 – Alterações nas áreas de impacto para $s/d_c = 0.5$ (a) $\theta = 55^\circ$ e (b) $\theta = 19^\circ$ onde s = altura do degrau, d_c = altura crítica e θ = ângulo da calha (fonte: adaptado TAKAHASHI, M. e OHTSU I (2012)).

- Características macro turbulentas (Figura 3): TOZZI (1992), BINDO et al (1993), CHANSON et al. (2002), POVH (2000), SANAGIOTTO (2003), DAI PRÁ (2004), entre outros.

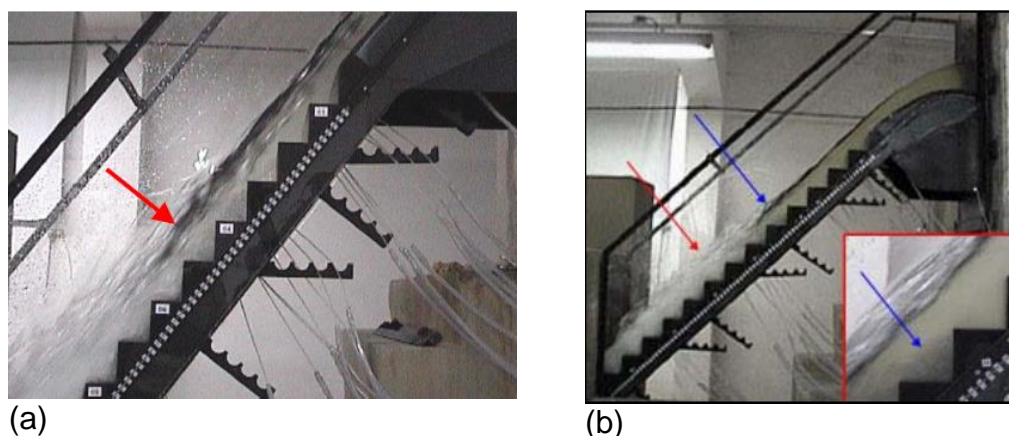


Figura 3 – (a) Características macro turbulentas - início de aeração incipiente. Fonte: Sanagiotto (2003). (b) início de aeração incipiente e da aeração total a partir da visualização do escoamento. Fonte: DAI PRÁ (2004).

- Caracterização de propriedades da mistura ar-água e da dissipação de energia ao longo dos degraus (Figura 4): CHANSON (1993), MATOS (1999), CHAMANI e RAJARATNAM (1999 a e b), CHANSON (2002), CHANSON e

TOOMBES (2002), CHANSON et al. (2002), BOES e HAGER (2003), PFISTER (2008), ZHANG E CHANSON (2017) entre outros.

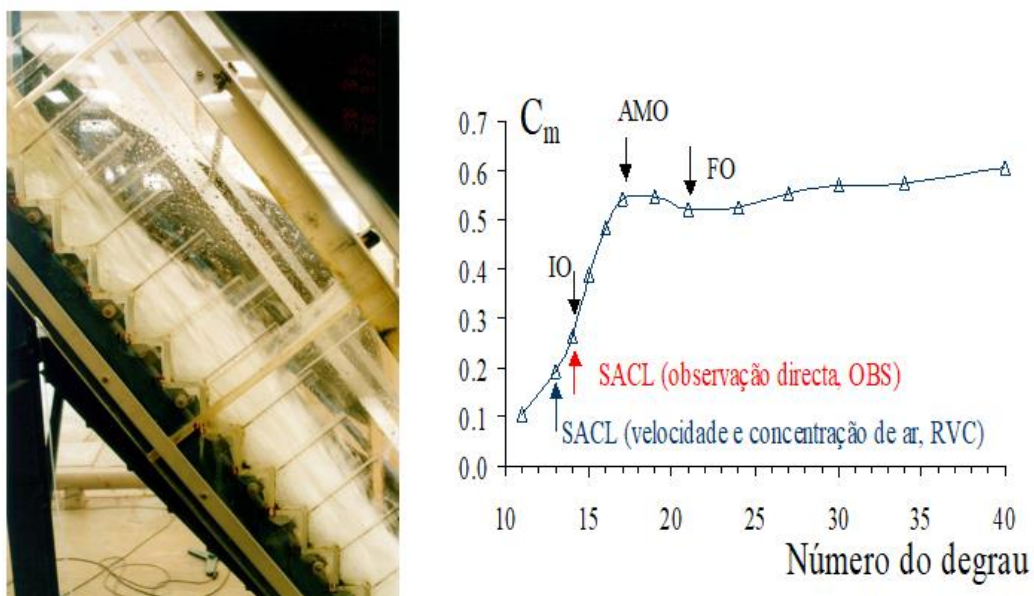


Figura 4 - Distribuição longitudinal da concentração de ar na calha de vertedouros em degraus. Fonte: MATOS (1999).

- Alterações na geometria dos degraus (Figura 5): ANDRÉ (2004), ANDRÉ e MATOS (2005), CHANSON e GONZALEZ (2004), entre outros.

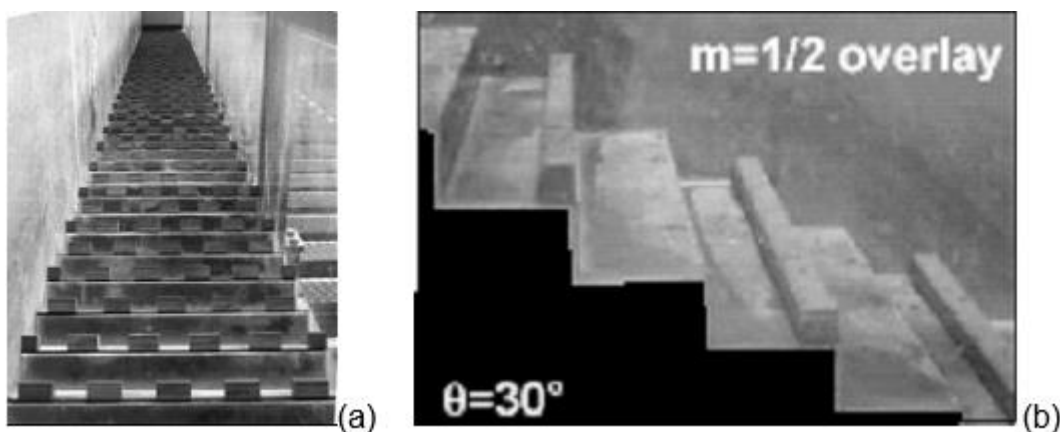


Figura 5 - Configurações do estudo de André (2004) e suas visualizações do padrão do escoamento. Fonte: ANDRÉ (2004)

- Aeração induzida (Figura 6): PFISTER, et al (2006), WANG ET al. (2012), TERRIER (2016), CANELLAS et al. (2017), PRIEBE (2020), NOVAKOSKI (2022 previsão de publicação) entre outros.

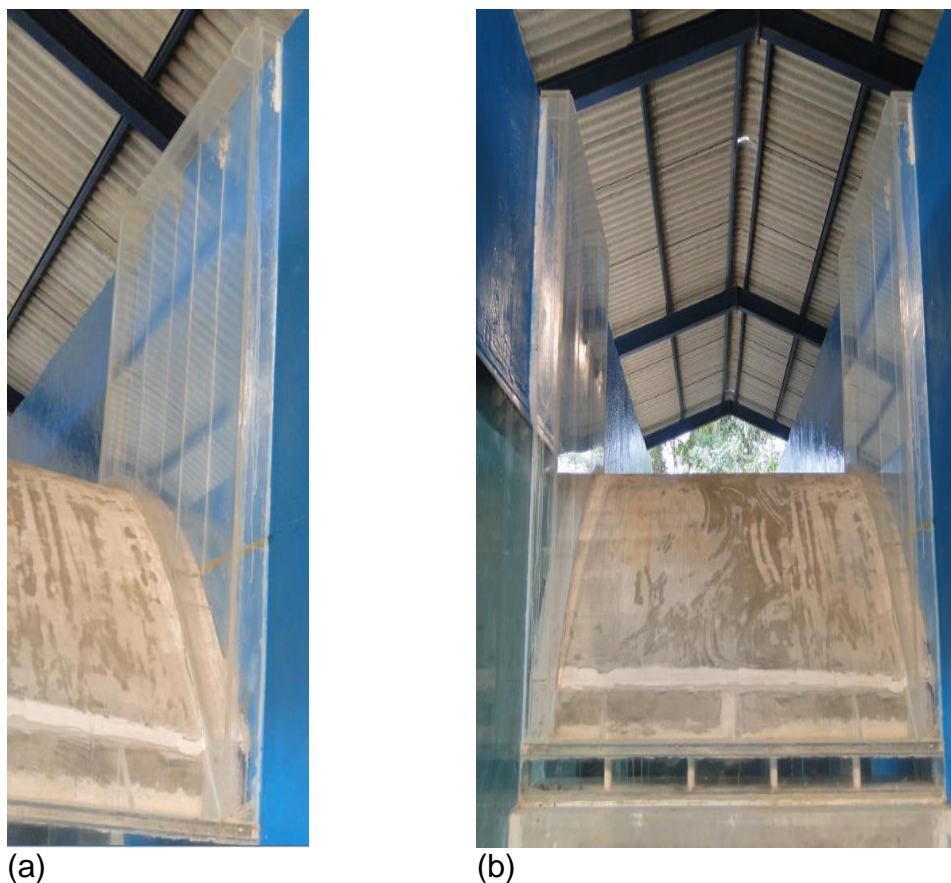


Figura 6 - Aeração induzida por: (a) Pilar e (b) câmara de ar. Fonte: PRIEBE (2020)

- Modelos numéricos (Figura 7): CHEN; DAI e LIU (2002), TABBARA; et al (2005), ARANTES (2007), MEIRELES (2011), LOPES et al (2018), TASSINARI et al (2020) entre outros.

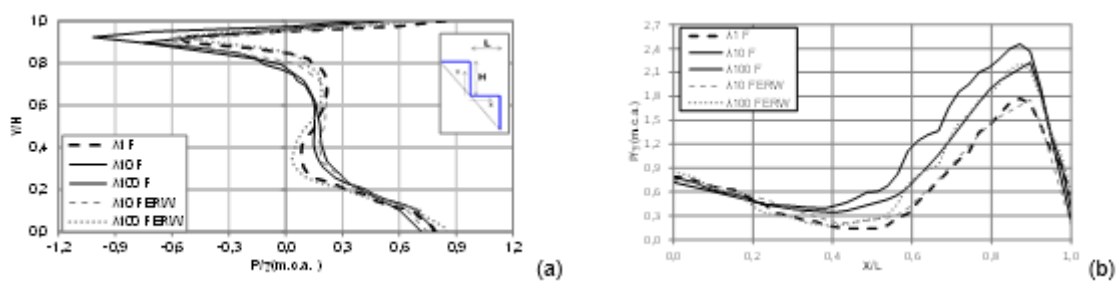


Figura 7 - Cargas de pressão no degrau 24 para a vazão de protótipo $q = 10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$. Zona aerada. (a) espelho e (b) patamar. Fonte: TASSINARI (2020)

- Outras aplicações (Figura 8): MANSO e SCHLEISS (2002), PINHEIRO e RELVAS (1999), FRIZELL et al. (2000), PINHEIRO et al. (2003), entre outros.



Figura 8 - Estudo detalhado sobre a construção de vertedouros de cheia em blocos pré-fabricados sobre barragens de aterro - Instituto Superior Técnico, LNEC (Cortesia do Eng. Marcelo G. Marques)

3.2 Características gerais do escoamento sobre vertedouros em degraus

3.2.1 Tipos de escoamento

De acordo com CHANSON (1994), o escoamento ao longo de calhas em degraus pode ser classificado como escoamento “nappe flow” e “skimming flow”. Neste trabalho será utilizada a denominação traduzida por MATOS e QUINTELA (1995) de escoamento em quedas sucessivas – EQS (“nappe flow”) e escoamento deslizante sobre turbilhões – EDT (“skimming flow”).

No primeiro regime (EQS), existe uma sucessão de quedas livres seguidas por pequenos “ressaltos hidráulicos” que ocorrem em cada degrau (Figura 9 (a)). A dissipação de energia ocorre tanto na queda do jato d’água quanto no “ressalto” (SANAGIOTTO e MARQUES, 2008), ocorrendo geralmente para pequenas vazões específicas. No segundo regime (EDT), que ocorre em vertedouros com calhas com maior declividade e maiores vazões específicas, se observa a formação de um pseudo-fundo (linha imaginária ligando as quinas dos degraus), abaixo do qual se formam vórtices que ficam “aprisionados” na cavidade do degrau e abaixo do escoamento que ocorre acima do pseudo-fundo (CHANSON, 1993) (Figura 9 (c)). Os

vórtices se desenvolvem abaixo do pseudo-fundo e a recirculação é mantida pela transmissão de energia do escoamento principal. A maior parte da dissipação de energia ocorre para manter os vórtices (CHANSON, 2002).

OHTSU e YASUDA (1997) denominam de “regime de transição (ERT)” o escoamento que ocorre entre o regime de quedas sucessivas e o regime deslizante sobre turbilhões (Figura 9 (b)). O ERT possui características de ambos os regimes, e deve ser evitado como condição primária de projeto (FRIZELL; FRIZELL, 2015). A Figura 9, apresentada por SIMÕES et al. (2010), mostra os três tipos de escoamento. Maiores informações sobre os tipos de escoamento desenvolvidos em vertedouros em degraus também podem ser obtidas em CHANSON (1994), MATOS (1999), CHANSON (2002), DAI PRÁ (2004) e SIMÕES (2012) entre outros.

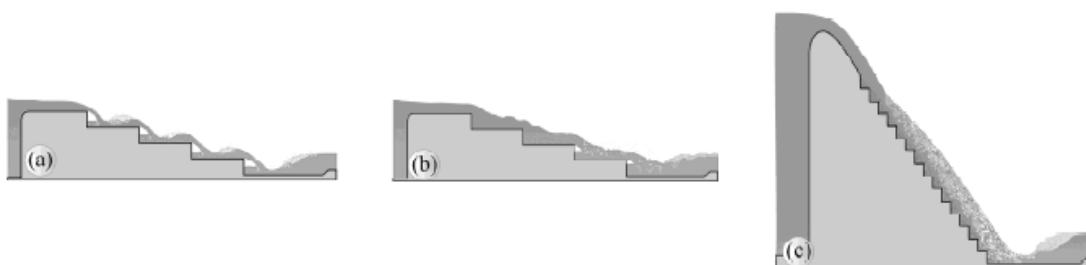


Figura 9 - (a) escoamento em quedas sucessivas, (b) escoamento de transição e (c) escoamento deslizante sobre turbilhões Fonte: SIMÕES et al. (2010)

A Figura 10 apresenta dados de diversos estudos que definem o regime de escoamento a partir da relação entre profundidade crítica (h_c) e altura do degrau (h_d) versus a relação entre altura (h_d) e comprimento do degrau (l_d), esta última relação é a declividade da calha. Em um modelo físico de um vertedouro em degraus com declividade 1,00V: 0,75H, altura do degrau = 0,06m e base do degrau = 0,045m, a Figura 10 mostra que o escoamento deslizante sobre turbilhões – EDT (“skimming flow”) ocorrerá para o número de Froude rugoso (F^*) > 1,71, como pode ser visto a seguir:

$$\text{Para } \frac{h_d}{l_d} = \frac{0,06}{0,045} = 1,33 \Rightarrow \frac{h_c}{h_d} = 0,8 \Rightarrow h_c = 0,048 \text{ m} \Rightarrow q = 0,033 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \Rightarrow F^* = 1,71$$

Sendo:

F^* = número de Froude rugoso (adimensional)

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

Equação 1

Onde:

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

g = aceleração da gravidade (m/s^2)

α = declividade da calha ($^\circ$)

k = rugosidade do degrau = $l_d \cdot \cos \alpha$

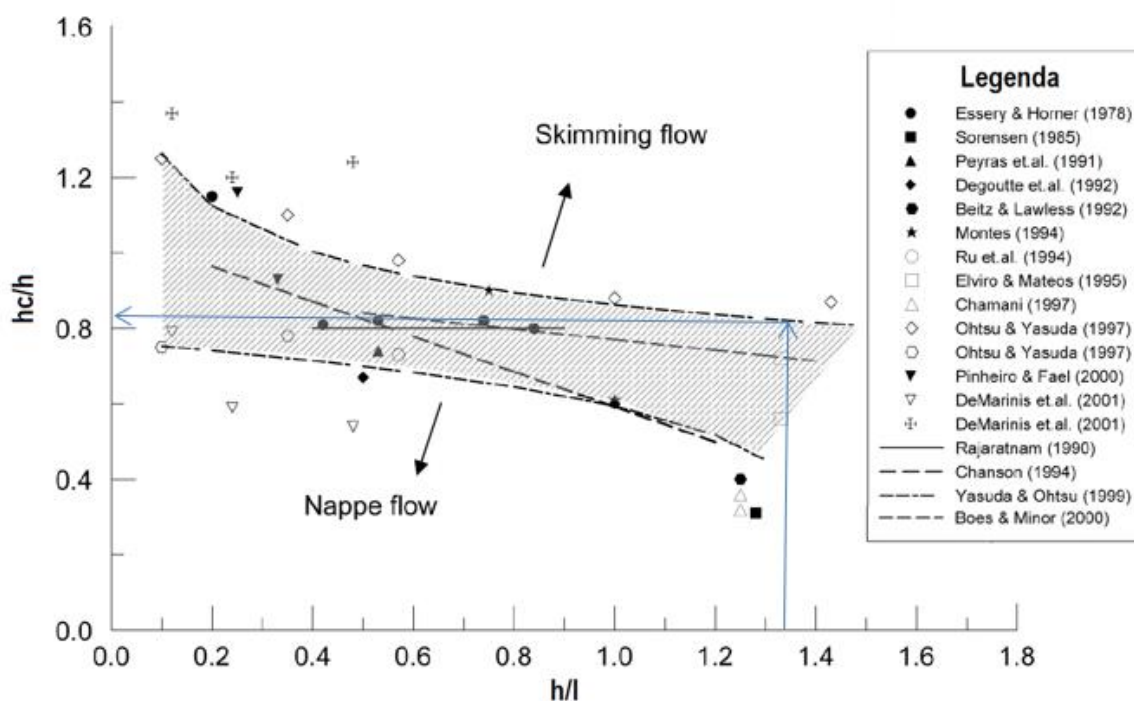


Figura 10 - Gráfico resumo com dados de demarcações para os regimes de escoamento “Nappe Flow” (EQS) e “Skimming Flow” (EDT) propostos por diversos autores. Adaptado de: FRIZELL e FRIZELL (2015). Onde $h = h_d$ e $l = l_d$.

3.2.2 Escoamento Deslizante sobre Turbilhões (EDT)

O escoamento deslizante sobre turbilhões (EDT) ocorre principalmente em vertedouros em degraus com inclinações elevadas e vazões específicas altas e é caracterizado pela formação de turbilhões na cavidade dos degraus. O escoamento principal desliza sobre os turbilhões, que servem de “rolamento” para o escoamento. Os vórtices são formados devido à transmissão de energia do escoamento principal quando da passagem do mesmo pelas quinas dos degraus (CHANSON (2001)).

A Figura 11 apresenta exemplos de escoamento deslizante sobre turbilhões na Barragem de Dona Francisca (RS) e em um modelo de laboratório (LOH/IPH/UFRGS).

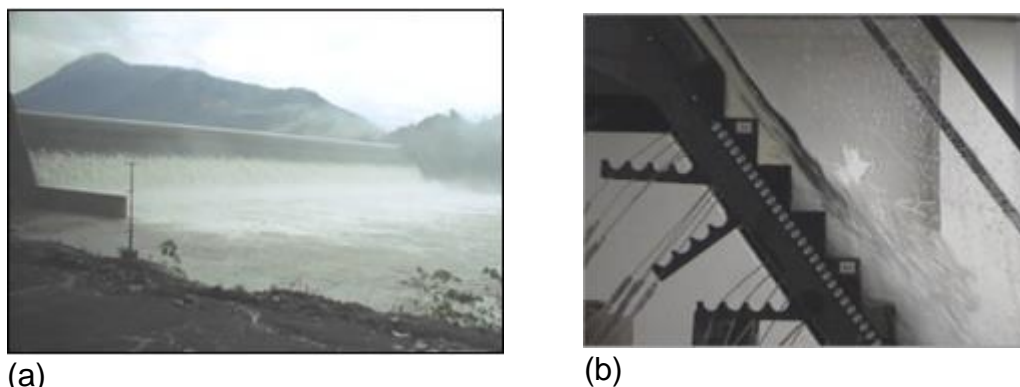


Figura 11 - escoamento deslizante sobre turbilhões: (a) Barragem de D. Francisca - cortesia de Marcelo Giulian Marques, (b) Início de aeração incipiente. Fonte: SANAGIOTTO (2003).

No escoamento deslizante sobre turbilhões a linha de água da superfície é lisa e monofásica nos primeiros degraus quando a camada limite está se desenvolvendo – trecho 1 da Figura 12. À medida que o escoamento se desenvolve para jusante, o mesmo passa a apresentar ondulações na superfície –final do trecho 1 da Figura 12. No ponto A na Figura 12 ocorre o afloramento da camada limite, que se dá mais a montante em comparação com os vertedouros com calha lisa, uma vez que as rugosidades na superfície do vertedouro em degraus aceleram o desenvolvimento da camada limite. (FRIZELL; FRIZELL, 2015; GOMES, 2006; ZHANG; CHANSON, 2016). A região de afloramento da camada limite é denominada como ponto de início da aeração (CHANSON (1994)). No trecho 2 da Figura 12 inicia-se de forma significativa a entrada de ar no escoamento com alta turbulência, neste ponto o escoamento passa a ser rapidamente variado tendo pequena extensão.

No trecho 3 o ar incorporado já se estende por toda a profundidade do escoamento gradualmente variado, os vórtices no interior dos degraus podem ser facilmente identificáveis. A Figura 13 ilustra a respeito.

No trecho 4 o escoamento está completamente desenvolvido. O mesmo tem as características de um escoamento uniforme onde a profundidade, a velocidade, as pressões e a concentração de ar podem ser consideradas constantes.

A diferença de características do escoamento em cada trecho, conforme demonstrado na Figura 12, indica a importância de se determinar os locais na calha onde estes trechos acontecem para cada vazão.

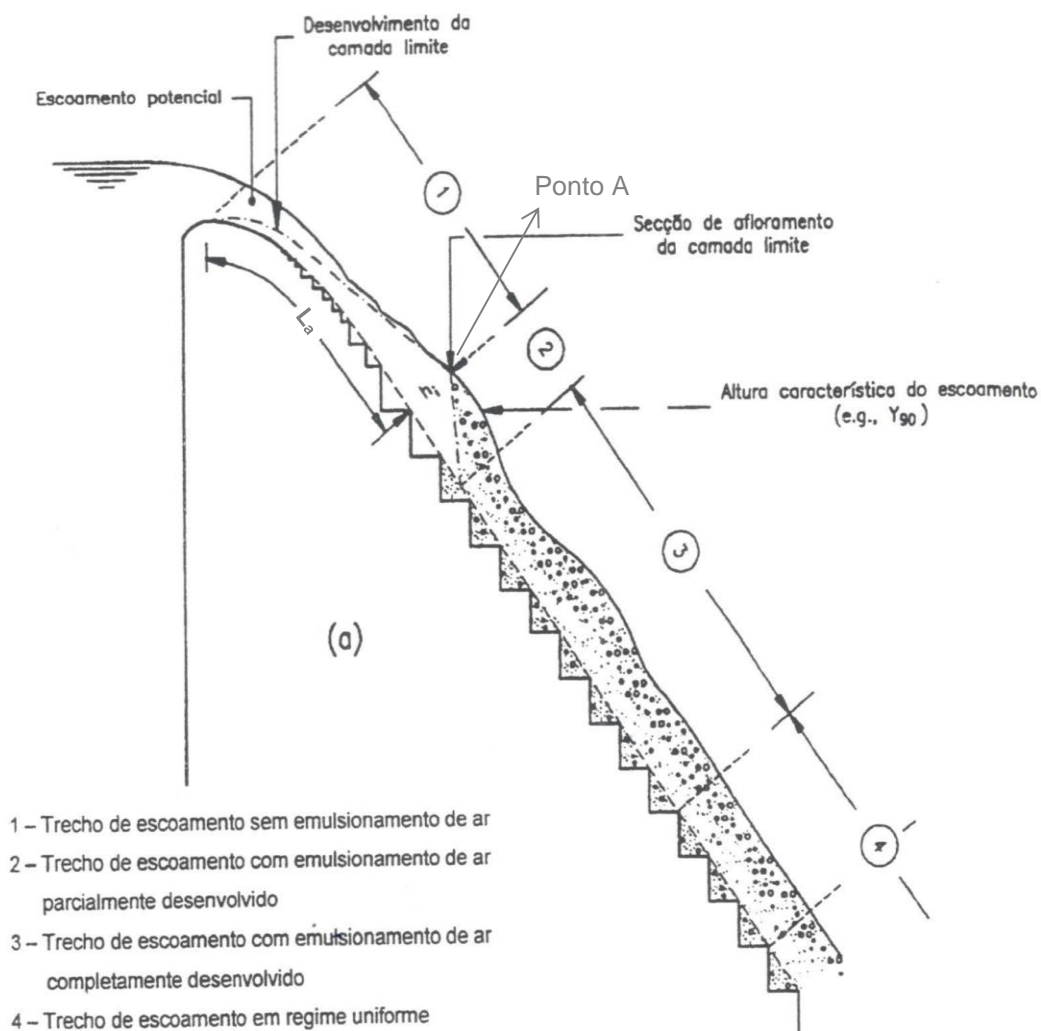


Figura 12 – Representação esquemática do perfil longitudinal e padrão do escoamento deslizante sobre turbilhões (EDT) em vertedouros em degraus (conforme MATOS, 1999).

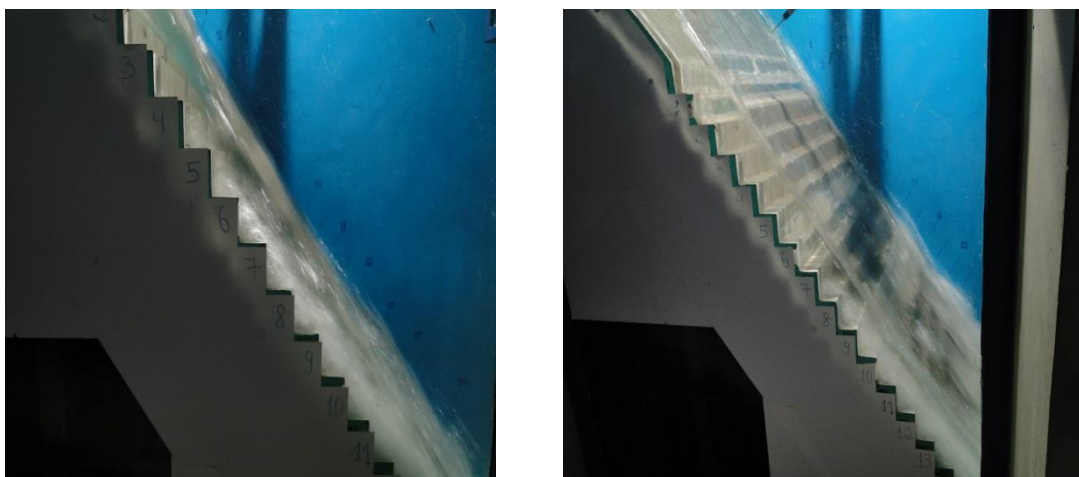


Figura 13 - Modelo LAHE - visão lateral do escoamento.

3.3 Posição de Início da Aeração

A determinação do ponto de início da aeração é importante no estudo do escoamento sobre vertedouros em degraus pois marca o início da entrada de ar no fluxo a partir de onde o risco de cavitação na superfície do vertedouro diminui. Este ponto ocorre quando a camada limite atinge a total profundidade da lâmina d'água (ponto A na Figura 12).

Cabe ressaltar que, como já é consenso entre os pesquisadores, a aeração do escoamento diminui o risco potencial de danos por cavitação. A determinação do ponto de início da aeração delimita o trecho a montante como o de maior risco de ocorrência de danos, onde as pressões extremas devem ser mais atentamente analisadas e a superfície de concreto mais rigorosamente definida.

A Tabela 1 apresenta algumas equações propostas por diferentes autores para determinação do ponto de início de aeração (L_a). A Figura 14 apresenta os parâmetros utilizados nas equações.

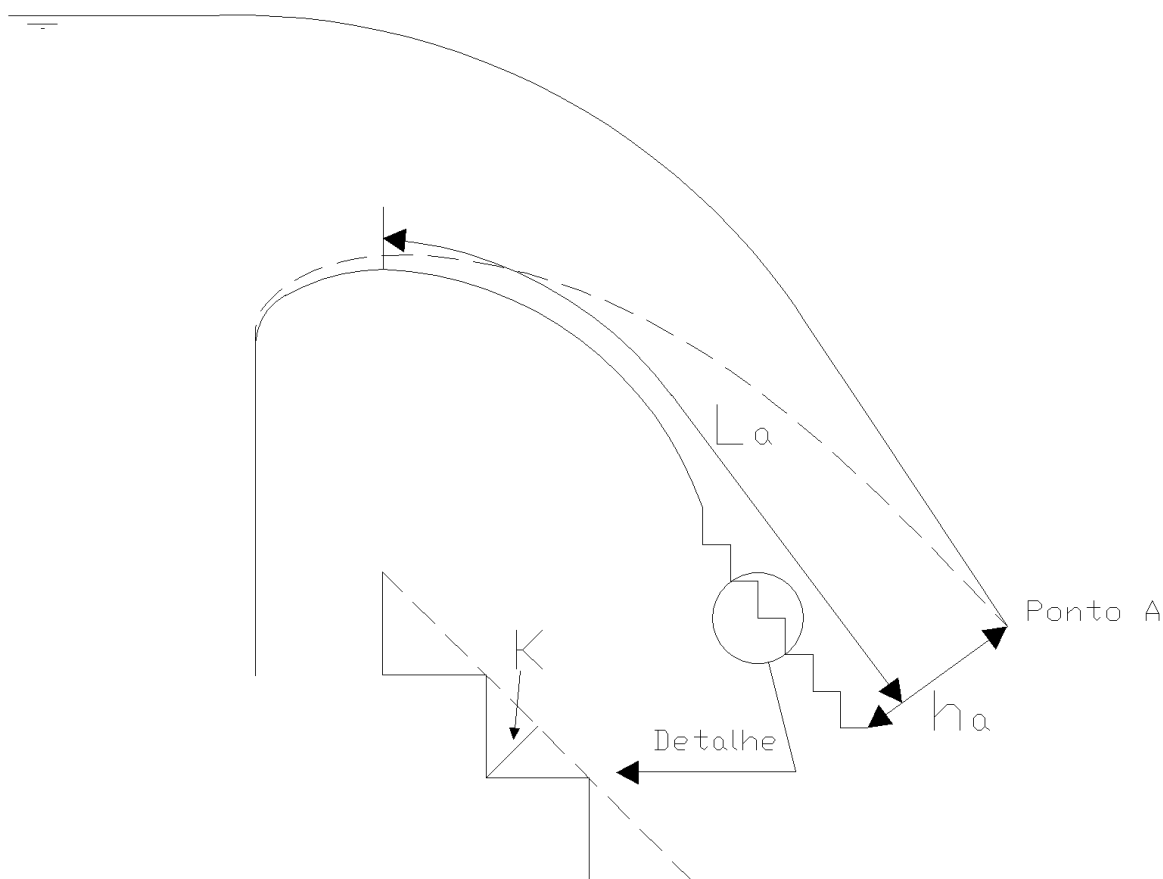


Figura 14 - Parâmetros utilizados nas equações da tabela 1. Fonte: adaptado de TOZZI (2004)

Tabela 1 - Equações sugeridas por diversos autores para posição de início da aeração.

Autor	Equações propostas
WOOD et al (1983)	$\frac{L_a}{k} = 13,6(\text{sen}\alpha)^{0,0796} F^{*0,713}$
CHANSON (1994)	$\frac{L_a}{k} = 9,7198(\text{sen}\alpha)^{0,0796} F^{*0,71} ; 27^\circ < \alpha < 52^\circ$
MATOS (1999)	$\frac{L_a}{k} = 6,289 F^{*0,734} ; \alpha = 53,1^\circ$
CHANSON E TOOMBES (2002)	$\frac{L_a}{k} = \frac{12,34}{(\text{sen}\alpha)^{0,0796}} F^{*0,465} ; 16^\circ < \alpha < 22^\circ$
MATEOS IGUACEL e ELVIRO GARCIA (1999)	$\frac{Z'}{h_d} = 5,6\left(\frac{q}{\sqrt{g \cdot h_d^3}}\right)^{0,8}$
BOES e HAGER (2003)	$L_{a;c=0,01} = \frac{5,90 \cdot h_c^{6/5}}{(\text{sen}\alpha)^{7/5} h_d^{1/5}} ; 26^\circ < \alpha < 75^\circ$
SANAGIOTTO (2003)	$\frac{L_a}{k} = 9,7721 F^{*0,7014} ; \alpha = 53,1^\circ$
AMADOR (2005)	$\frac{L_a}{k} = 5,982 F^{*0,840} ; \alpha = 51,3^\circ$
ANDRE et al (2009)	$\frac{L_a}{k} = \frac{8}{\tan(\alpha)} F^{*0,73} ; 16^\circ < \alpha < 30^\circ$
CONTERATO (2011)	$\frac{L_a}{k} = 12 F^{*\frac{2}{3}} ; \alpha = 53,1$
MEIRELLES et al (2012)	$\frac{L_a}{k} = 6,75 F^{*0,76} ; \alpha = 51,3^\circ$

Fonte: adaptado de CONTERATO (2014)

Onde:

L_a = Posição de início da aeração a partir do início da crista do vertedouro (m);

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

k = altura de rugosidade do degrau (m);

F^* = número de Froude rugoso, conforme Equação 2(adimensional).

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot k^3 \cdot \text{sen}(\alpha)}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

q = vazão específica (m³/s/m)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

α = declividade da calha (°)

$L_{a;C=0,01}$ = ponto de início da aeração onde a concentração média de ar no pseudo-fundo é 0,01 (m)

Z' = diferença entre as cotas da crista do vertedouro e a altura média do degrau no qual se observa o início da aeração (m)

h_d = altura degrau (m);

A Figura 15 apresenta os parâmetros L_a/k em função do número Froude rugoso (F^*) calculados através das equações de WOOD et al (1983), CHANSON (1994), MATOS (1999), CHANSON E TOOMBES (2002), SANAGIOTTO (2003), BOES A HAGER (2003), AMADOR (2005), ANDRE ET AL (2009), CONTERATO(2011) e MEIRELES (2011) para uma faixa de $1,71 < F^* < 40$. Observa-se que não há um consenso entre as estimativas, como já havia sido observado por TERRIER (2016). Para número de $F^* = 40$ as diferenças máximas são da ordem de:

- SANAGIOTTO (2003) e MATOS (1999) $\approx 1,38$
- BOES A HAGER (2003) e MATOS (1999) $\approx 3,15$

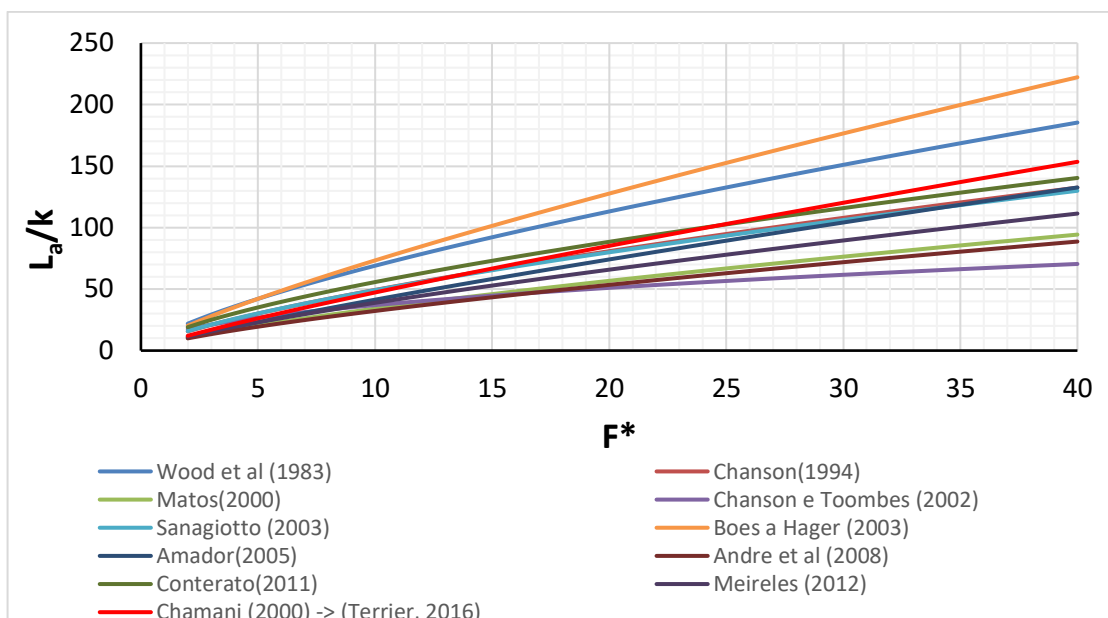


Figura 15 - Adimensionalizações para ponto de início da aeração do escoamento.

3.4 Aeração do Escoamento

A aeração é um fenômeno caracterizado pela incorporação de ar ao escoamento. O conhecimento do desenvolvimento da aeração nos escoamentos sobre vertedouros em degraus é de extrema importância, pois auxilia no dimensionamento dos muros laterais da estrutura, além de possibilitar a redução do risco de erosão por cavitação no concreto.

A incorporação de ar no escoamento permite a redução do risco de erosão por cavitação no concreto. PETERKA (1953) indica que 7% na relação entre a vazão de ar e a vazão de água no escoamento é suficiente para evitar o risco de cavitação em estruturas de concreto. A concentração de ar (C), que indica a quantidade de ar incorporada ao escoamento, é determinada pela razão entre o volume de ar e o volume total da mistura ar-água.

CHAMANI e RAJARATNAM (1999) elaboraram a Equação 3 para calcular a concentração de ar em um escoamento deslizante sobre turbilhões com aeração completamente desenvolvida. A Equação 4 foi proposta por MATOS (1999) para definir esta concentração como função da altura do vertedouro (H_v) e da altura crítica do escoamento (h_c).

$$C = 0,93 \cdot \log\left(\frac{\text{sen}\alpha^{0,1}}{q^{0,3}}\right) + 1,05 \quad \text{Equação 3}$$

$$C = 0,62 - \frac{55,9}{(H_v/h_c)^2} \quad \text{Equação 4}$$

MATOS (1999) baseado em um modelo com altura do degrau (h_d) de 8 cm, declividade da calha de 1:0,75 e vazões específicas entre 0,08 m²/s e 0,20 m²/s, ajustou modelos de previsão da concentração de ar ao longo da calha do vertedouro para concentrações médias (C_m) que podem ser estimadas pelas equações abaixo.

$$C_m = 0,210 + 0,297 * e^{(-0,497 * (\log_{exp} s' - 2,972))} \quad \text{para } s' < 30 \quad (r = 0,980) \quad \text{Equação 5}$$

$$C_m = \left(0,888 - \frac{1,065}{\sqrt{s'}}\right)^2 \quad \text{para } s' \geq 30 \quad (r = 0,907) \quad \text{Equação 6}$$

Onde

C_m = Concentração média do ar na seção

s' = coeficiente de posição com valor 0 no ponto de início da aeração.

$$s' = \frac{(L - L_a)}{h_a} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

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

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

h_a = profundidade do escoamento na seção de início da aeração;

MATOS (1999) também propôs modelos de previsão de concentração média de ar (C_s) afastada do pseudo-fundo (linha imaginária ligando as quinas dos degraus) em três diferentes alturas: $Y_1 = 0,32$ cm; $Y_2 = 0,82$ cm e $Y_3 = 1,32$ cm. A concentração média de ar pode ser estimada pela (Figura 16) ou pela equação abaixo:

$$C_s = \frac{a}{1 + \left(\frac{s'}{b}\right)^c} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

C_s = concentração média de ar a uma altura de $Y_1 = 0,32$ cm; $Y_2 = 0,82$ cm e

$Y_3 = 1,32$ cm do pseudo-fundo

a, b, c - Parâmetros do modelo (Tabela 2);

R = coeficiente de correlação

Tabela 2 – Valores dos coeficientes a, b, c para a estimativa da concentração média de ar a alturas de $Y_1 = 0,32$ cm; $Y_2 = 0,82$ cm e $Y_3 = 1,32$ cm do pseudo-fundo (da quina do degrau).

y (cm)	$C_s = a/[1+(s'/b)^c]$				Dados experimentais utilizados
	a	b	c	R	
0,32	0,381	14,189	-1,232	0,962	Totalidade $s' < 20$
	0,324	10,195	0,977	0,977	
0,82	0,470	14,787	-1,162	0,961	Totalidade $s' < 20$
	0,417	11,028	-1,644	0,961	
1,32	0,517	14,454	-1,126	0,955	Totalidade $s' < 20$
	0,424	9,514	-1,798	0,943	

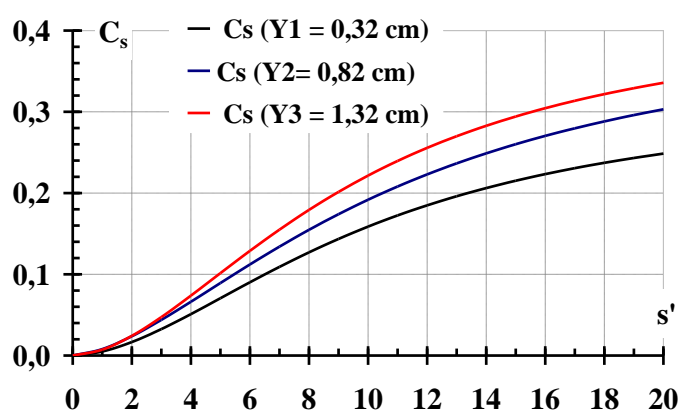


Figura 16 - Concentrações médias de ar a distâncias de 0,32 cm, 0,82 cm e 1,32 cm do pseudofundo (C_s), segundo modelos de MATOS (1999).

ZHANG e CHANSON (2016) elaboraram uma lista de autores que determinaram equações para o cálculo da concentração de ar ao longo do vertedouro em degrau (Anexo G). Não havendo um consenso sobre a melhor forma de estimar a concentração de ar, optou-se por utilizar a equação proposta por MATOS (1999)

(Equação 8) uma vez que o autor utilizou a mesma declividade do presente estudo (1V:0,75H).

3.5 Distribuição da pressão ao longo da calha.

Nas últimas três décadas diversos autores vêm estudando experimentalmente as pressões ao longo da calha de vertedouros em degraus, a maior parte dos estudos se deteve na determinação das pressões médias, estando entre eles os seguintes estudos: HOUSTON (1987), FRIZELL e MELFORD (1991), SANAGIOTTO (2003), DANESHFARAZ, R. et al. (2016).

A Figura 17 mostra os coeficientes de pressão média definidos por SANAGIOTTO (2003). Como demonstrado pela autora, os menores valores do coeficiente ocorrem no espelho próximo à quina (Figura 17(a)) e os maiores valores ocorrem no patamar, também próximo à quina (Figura 17(b)).

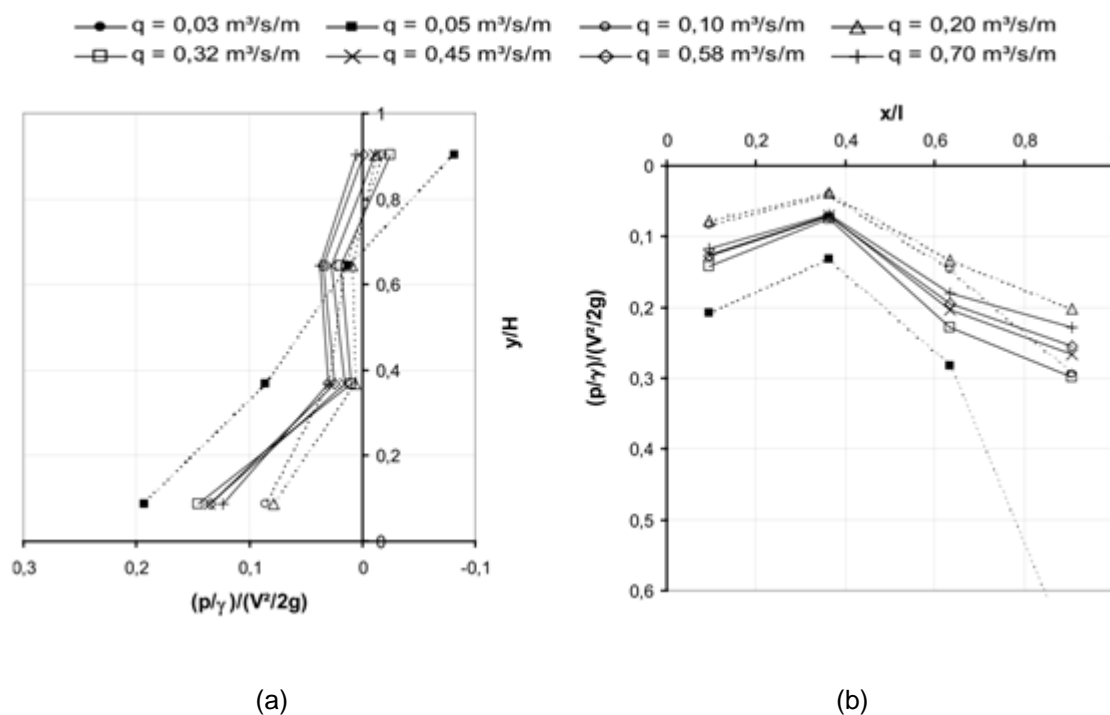


Figura 17 - Coeficientes de pressão média no: (a) espelho e no (b) patamar do degrau 18 do experimento de SANAGIOTTO (2003) para diferentes vazões específicas. Adaptado de: SANAGIOTTO (2003)

Alguns pesquisadores além das pressões médias analisaram as pressões “instantâneas”: TOZZI (1992), OLINGER (2001), SÁNCHEZ-JUNY (2001), SANAGIOTTO (2003), DAÍ PRÁ (2005), GOMES (2006), AMADOR; SÁNCHEZ-

JUNY; DOLZ, (2009); CHEN; DAI; LIU, (2002); LOBOSCO; SCHULZ, (2010), DAI PRÁ et al. (2012), e OSMAR (2016). Estes autores mostraram que, de maneira geral:

- As pressões negativas mais significativas aparecem nos espelhos (face vertical), dos degraus.
- As menores pressões negativas ocorrem na proximidade da quina,
- As maiores pressões positivas aparecem no patamar (face horizontal), na região de impacto do jato.
- As pressões mais críticas (positivas e negativas) ocorrem na região próxima ao afloramento da camada limite, conforme observações de AMADOR et al. (2004), AMADOR (2005), GOMES (2006) entre outros.

Poucos autores apresentaram modelos de previsão para a distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas e máximas junto às quinas dos degraus: AMADOR (2005), GOMES (2006) e OSMAR (2016). A Tabela 3 apresenta as características dos experimentos utilizados por estes pesquisadores.

Tabela 3 – Características dos experimentos de AMADOR (2005), GOMES (2006) e OSMAR (2016).

Características	AMADOR (2005)		GOMES (2006)*	OSMAR (2016)**	
	Modelo da			SANAGIOTTO (2003)	CONTERATO (2011)
	UPC	UDC			
Inclinação da calha	1V:0,8H	1V:0,8H	1V: 0,75H	1V: 0,75H	1V: 0,75H
Altura do vertedouro (m)	4,45	2,00	2,42	2,44	2,45
Largura do canal (m)	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04
Altura dos degraus (m)	0,06	0,05	0,03; 0,06; 0,09	0,03; 0,06; 0,09	0,06
Vazões específicas ensaiadas (m ³ /s/m)	0,05 a 0,3	0,06 a 0,09	0,02 a 0,7	0,02 a 0,7	0,1 a 0,27
Frequência de aquisição de dados (Hz)	100	80	50	50	128
Modelo de previsão para o espelho	$(P_{0,1\%})/\gamma$		$(P_{0,1\%})/\gamma$ e $(P_{99,9\%})/\gamma$	$(P_{0,1\%})/\gamma$ e $(P_{99,9\%})/\gamma$	
Modelo de previsão para o Patamar	-		$(P_{0,1\%})/\gamma$ e $(P_{99,9\%})/\gamma$	$(P_{0,1\%})/\gamma$ e $(P_{99,9\%})/\gamma$	

* Usou mesmo modelo utilizado por SANAGIOTTO (2003)

** Usou dados dos estudos de SANAGIOTTO (2003) e CONTERATO (2011)

Para fazer o seu modelo de previsão das pressões extremas mínimas que podem ocorrer junto às quinas dos espelhos AMADOR (2005) considerou a formulação abaixo.

$$C_{p0,1\%} = \frac{P_{0,1\%}}{\gamma \frac{v_{am}^2 a_m}{2g}} = \frac{a}{[1 - b \cdot \exp(-cs')]} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo:

$C_{p0,1\%}$ = coeficiente de pressão para a pressão mínima com probabilidade de 0,1 % de não excedência

$P_{0,1\%}/\gamma$ = pressão junto à quina do espelho do degrau com 0,1% de probabilidade de não excedência, calculada através do emprego de uma função de distribuição de mínimos tipo III (Weibull);

v_{am} = velocidade média do escoamento na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

a, b, c - Parâmetros do modelo (Tabela 4)

s' = Coeficiente de posição com valor 0 no ponto de início da aeração

A altura da lâmina (h_a) na seção foi estimada pela equação proposta por Meireles et al. (2012).

$$\frac{d}{h_a} = 0,971 + 0,891 \cdot e^{-3,41 \cdot (L/L_a)} \quad \text{Equação 10}$$

d = altura da lâmina de água no ponto considerado ($d = h$)

Tabela 4 - Parâmetros do modelo de previsão de pressões desenvolvido por AMADOR (2005).

Posição interna	Coef. de pressão	a	b	c
$z/h = 0,07$	C_{σ_p}	0,039	0,598	0,046
	$C_{p0,1\%}$	0,358	0,543	0,062
$y/l = 0,14$	C_{p_m}	0,153	0,471	0,061
	C_{σ_p}	0,121	0,400	0,067

Obs.: z = posição interna da tomada de pressão no espelho em relação à quina interna do degrau.
 y = posição interna da tomada de pressão no patamar em relação à quina interna do degrau.

Onde:

$$C_{Pm} = \frac{P_m}{\gamma \frac{V_i^2}{2g}} \quad \text{Equação 11}$$

$$C_{\sigma p} = \frac{\sigma_{mp}}{\gamma \frac{V_i^2}{2g}} \quad \text{Equação 12}$$

$$C_{P_{0,1\%}} = \frac{P_{0,1\%}}{\gamma \frac{V_i^2}{2g}} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo:

C_{Pm} = coeficiente de pressão médio

$C_{\sigma p}$ = coeficiente de pressão flutuante com base no desvio amostral

$\frac{P_m}{\gamma}$ = Pressão média

$\frac{\sigma_{mp}}{\gamma}$ = flutuação de pressão

$\frac{P_{0,1\%}}{\gamma}$ = Pressão com probabilidade de 0,1% de não excedência.

GOMES (2006), que utilizou um modelo com declividade de 1,0V:0,75H com degraus de 9 cm (um dos modelos utilizados por SANAGIOTTO (2003)), se baseou na proposta de adimensionalização das pressões propostas por AMADOR (2005). Para adimensionalizar as pressões extremas mínimas e máximas no espelho e no patamar e posição longitudinal utilizou:

$$C_{Px\%} = \frac{Px\%/\gamma}{V_m^2/2.g} \quad \text{Equação 14}$$

Onde:

$C_{Px\%}$ = coeficiente de pressão com x% de probabilidade de não excedência

X% = índice da pressão que pode ser:

* 99,9, 99 ou 95 % de ser inferior a um valor.

* 0,1, 1 ou 5% de ser inferior a um valor.

$P_{x\%}/\gamma$ = pressão com probabilidade X% de não excedência;

V_m = velocidade média do escoamento na seção (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

s' = posição longitudinal com valor 0 na posição de aeração. (adimensional);

$$s' = \frac{(L - L_a)}{h_a} \quad \text{Equação 15}$$

Sendo:

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

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

h_a = profundidade do escoamento no início da aeração;

Para o cálculo da profundidade do escoamento no início da aeração (h_a) GOMES (2006) utilizou a equação, proposta por MATOS (1999).

$$\frac{h_a}{k} = 0,361 \cdot F^{*0,606} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

h_a = profundidade do escoamento no início da aeração (m);

F^* = número de Froude rugoso (adimensional);

k = altura da rugosidade do degrau (m).

Os coeficientes de pressões extremas encontrados para os espelhos por GOMES (2006) estão apresentados na Figura 18. Os valores extremos ocorrem a jusante do ponto de aeração, em torno de $s' \approx 4$, indicando que a região crítica de cavitação deve ocorrer próximo à posição de início de aeração.

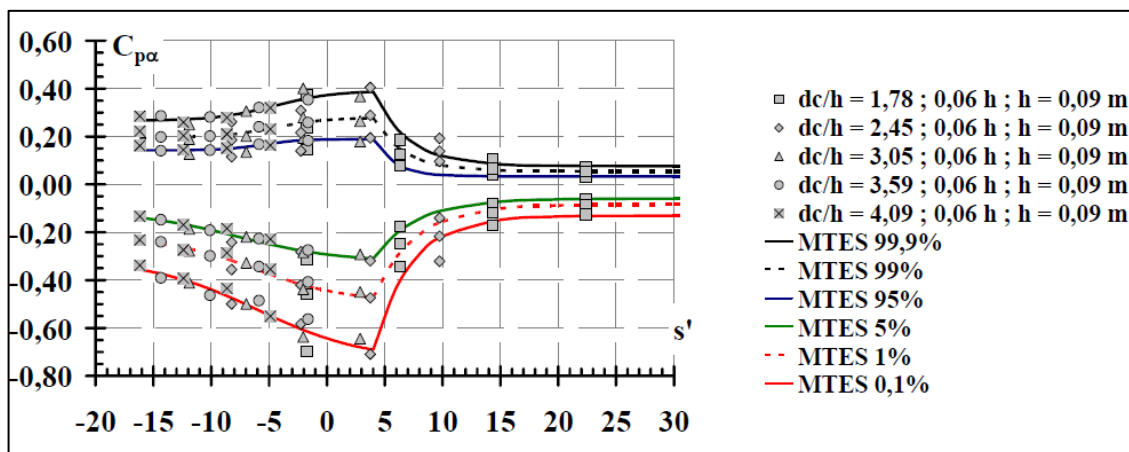


Figura 18 - Coeficientes de pressões extremas para o espelho a uma distância $0,06h$ da quina (degraus de 9 centímetros), onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d , $0,06h$ = localização da medição de pressão no espelho em relação à quina. Fonte: GOMES (2006)

As pressões extremas nos patamares verificadas por Gomes (2006) são mostradas na Figura 19. Os valores extremos para probabilidade de não exceder 0,1% no patamar são maiores que nos espelhos. Importante ressaltar a constatação do autor sobre a maior variação de pressões que ocorre no patamar em relação ao espelho. Este aspecto confere ao patamar a característica de ser submetido a uma maior amplitude de valores de pressões provenientes do escoamento. Esta informação é importante para o dimensionamento estrutural.

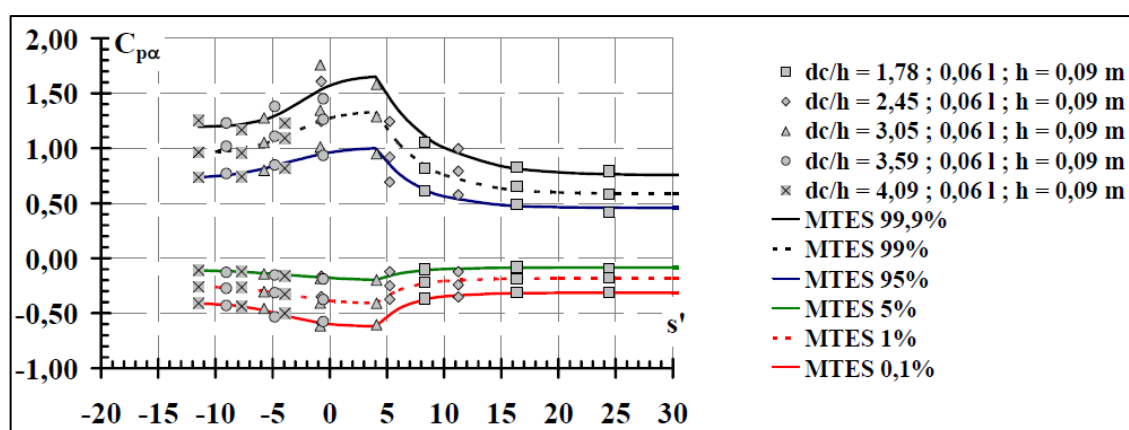


Figura 19 - Coeficientes de pressões extremas para o patamar do degrau, onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d , $0,06l$ = localização da medição de pressão no patamar em relação à quina. Fonte: GOMES (2006)

OSMAR (2016) realizou seus estudos com base nos dados coletados por SANAGIOTTO (2003) e CONTERATO (2011). CONTERATO (2011) realizou ensaios em modelo semelhante ao utilizado por SANAGIOTTO (2003), porém seus dados

foram adquiridos através de transdutores em 20 degraus simultâneos (espelho e patamar) e apenas em modelo com degraus de 6 cm de altura.

A Figura 20 e a Figura 21 apresentam os resultados para os coeficientes de pressão obtidos por OSMAR (2016) para as pressões extremas com probabilidades de não excedência de 0,1% e 99,9% para espelhos e patamares dos degraus comparados com os resultados de AMADOR (2005) e GOMES (2006). Pode-se observar que houve uma grande dispersão entre os dados dos diferentes autores, principalmente para as pressões mínimas no espelho ($C_{p0,1\%}$) e as pressões máximas nos patamares ($C_{p99,9\%}$).

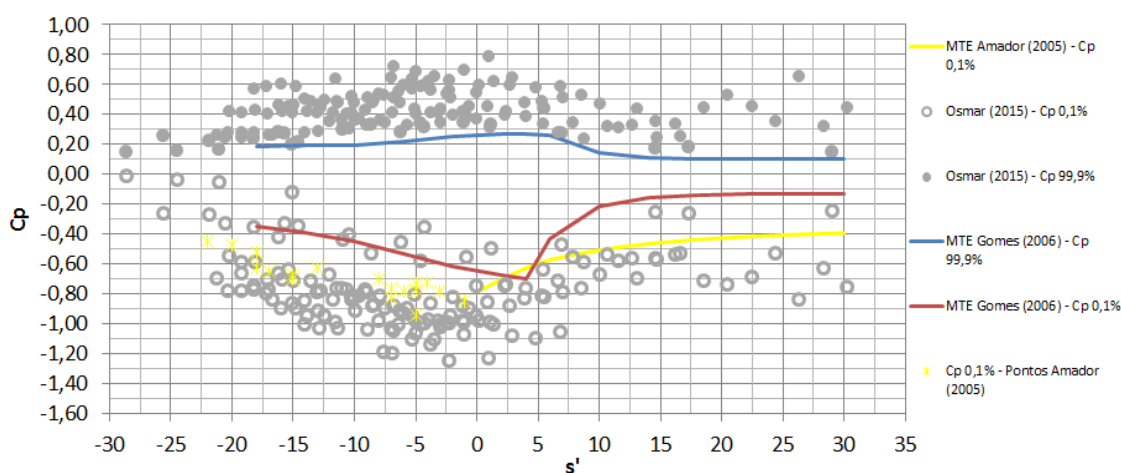


Figura 20 - Coeficientes de pressões extremas para os espelhos. Fonte: OSMAR (2016)

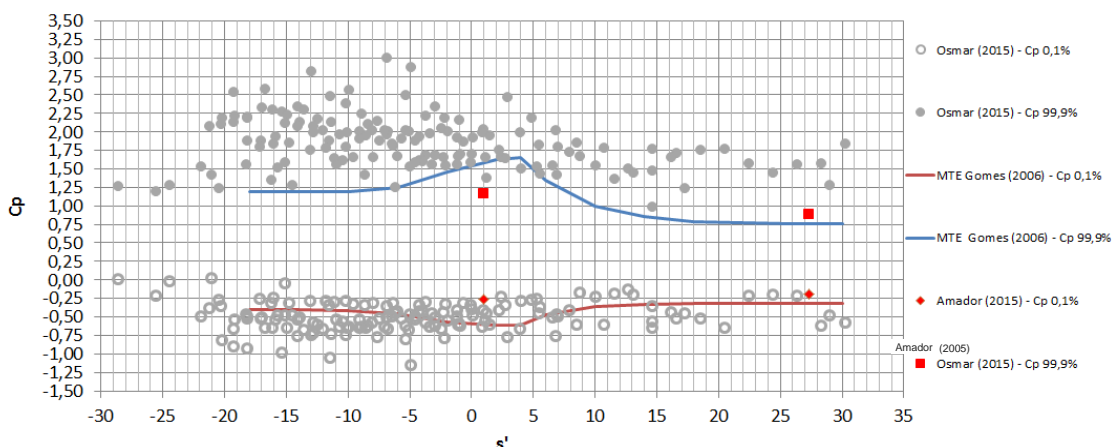


Figura 21 - Coeficientes de pressões extremas para os patamares. Fonte: OSMAR (2016)

Observando a Figura 20, OSMAR (2015) verificou que, para os espelhos, os valores máximos do $C_{p99,9\%}$ ocorreram no trecho inicial da calha (trecho não aerado). Os valores mínimos do $C_{p0,1\%}$ ocorreram no mesmo trecho sendo mais dispersos do que os $C_{p99,9\%}$. Os valores do estudo de OSMAR (2016) foram mais extremos do que

as previsões de AMADOR (2005) e GOMES (2006). A análise da Figura 21 levou à verificação que, para os patamares, os valores máximos de $C_{p99,9\%}$ e os valores mínimos de $C_{p0,1\%}$ ocorreram antes do início da aeração, oscilando entorno dos seguintes valores:

- $C_{p99,9\%} \approx 1,25$ a $3,0$
- $C_{p0,1\%} \approx 0$ a $-1,12$

Após a aeração os valores são:

- $C_{p99,9\%} \approx 1,25$ a $1,75$
- $C_{p0,1\%} \approx -0,25$ a $-0,75$

Os resultados de OSMAR (2016) são mais conservadores do que os obtidos por AMADOR (2005) para $C_{p99,9\%}$.

OSMAR (2016) também apresentou as pressões extremas adimensionalizadas na forma $P/\gamma/d_c$, onde d_c é a profundidade crítica do escoamento. A Figura 22 e a Figura 23 apresentam os resultados para espelhos e patamares, respectivamente.

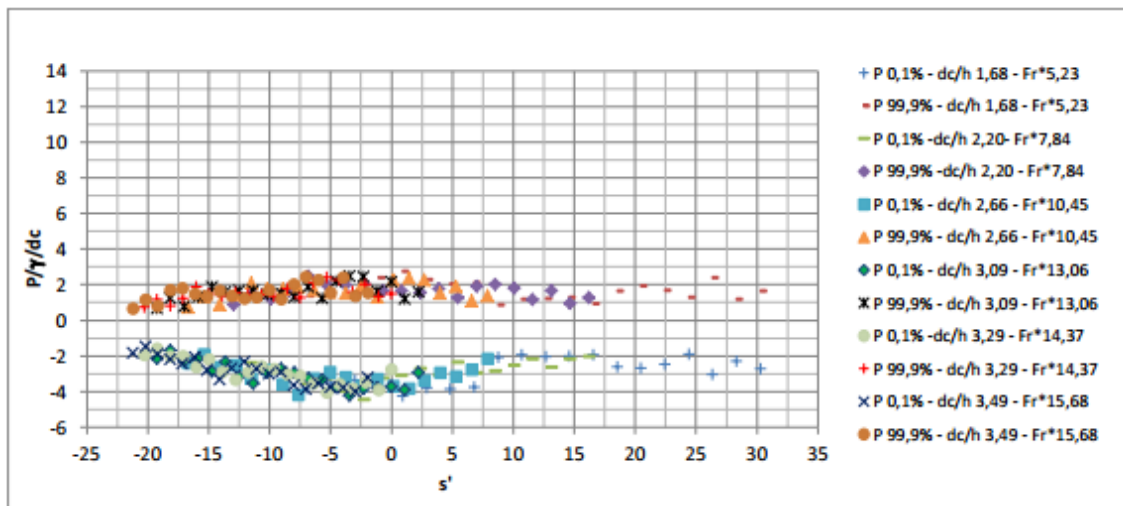


Figura 22 - Pressões extremas para os espelhos, onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d . Fonte: OSMAR (2016)

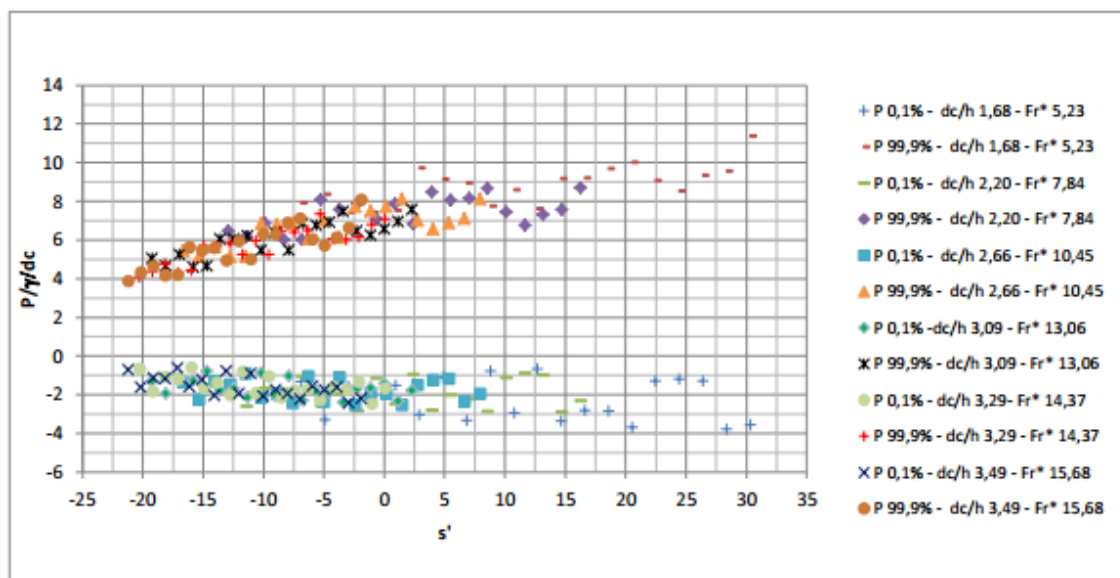


Figura 23 - Pressões extremas para os patamares, onde d_c = altura crítica = h_c ; h = altura do degrau = h_d . Fonte: OSMAR (2016)

Analisando a Figura 22 OSMAR (2016) concluiu que os menores valores de $P_{0,1\%}/\gamma/d_c \approx -4,5$ acontecem no espelho e ocorrem entre $-5 \leq s' \leq 5$. Para $s' > 5$ o valor de $P/\gamma/d_c \approx -3,0$. Para os patamares (Figura 23) os valores mínimos ficam após a aeração variando em torno de $P/\gamma/d_c \approx -3$, podendo chegar a $P/\gamma/d_c \approx -4$.

3.6 Limitação do escoamento – danos por cavitação

Quando as pressões negativas no escoamento chegam próximas à pressão de vapor (-10,2 m.c.a. a 20° C) podem gerar o fenômeno da cavitação, que, quando ocorre próximo da superfície do concreto, pode provocar danos. A severidade do dano está diretamente associada à intensidade das pressões, seu tempo de atuação na condição de baixa pressão e à resistência da superfície.

A cavitação é um fenômeno que pode ocorrer em fluídos e consiste no aumento das bolhas de ar existentes no mesmo quando o escoamento passa por zonas de pressão próxima à pressão de vapor da água e subsequente implosão destas bolhas quando a pressão volta a aumentar. Este fenômeno ocorre em escoamentos turbulentos cisalhantes, como os que ocorrem em vertedouro em degraus junto às quinas dos degraus. O colapso das bolhas é muito rápido e origina ondas de choque de alta pressão que, quando próximas a superfícies sólidas, resultam danos por fadiga com consequente remoção de material sólido provocando danos às superfícies (ARNDT (1981)). Desta forma, a análise das pressões extremas mínimas pode estabelecer critérios para a identificação de quando podem ocorrer danos por

cavitação. Este dano pode ser reduzido com a presença de ar no escoamento junto à superfície sólida. Não há consenso na literatura especializada de qual é a relação (β) entre a vazão de ar (q_a) e a vazão de água (q_w) ou a concentração de ar C_s ($C_s = q_a/(q_a+q_w)$) necessária junto ao fundo para a proteção da superfície contra o efeito da cavitação, sendo mencionados os seguintes limites pelos autores abaixo:

- PETERKA (1953) →
 - $\beta \geq 2\%$ ($C_s \geq 2\%$) - já apresenta grandes benefícios contra danos.
 - $\beta \geq 7\%$ ($C_s \geq 7,4\%$) - capaz de eliminar completamente os efeitos da cavitação em um teste com duas horas de duração.
- MATOS, (1990) → $C_s \geq 6\%$ a 8% - já protege a superfície sólida;
- PINTO; NEIDERT; OTA, (1982) → $C_s \geq 5\%$ e 10% - já protege dos efeitos de cavitação.

Em função dos estudos realizados em modelos físicos sabe-se que, após a aeração do escoamento praticamente não há risco de dano por cavitação nos degraus, uma vez que a existência de ar no escoamento protege os degraus.

As resistências dos concretos empregados em estruturas hidráulicas foram avaliadas por GAL'PERIN et al. (1971) e HOUGHTON et al. (1978) apud CHANSON (1988) com o objetivo de verificar seu comportamento frente ao fenômeno da cavitação, conforme mostrados na Figura 24 e Figura 25. GAL'PERIN et al. (1971), estabeleceram uma relação entre a velocidade máxima que o concreto pode suportar e a resistência do mesmo. HOUGHTON et al. mostraram a influência do tempo de exposição à cavitação na profundidade da fossa de erosão, conforme o tipo de concreto empregado. Ficando evidente a influência da adição empregada.

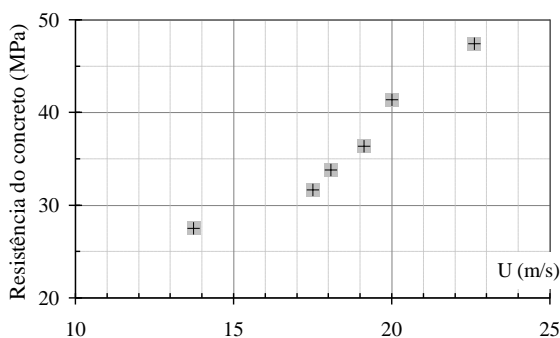


Figura 24 - Resistência necessária do concreto para evitar erosão por cavitação em escoamentos onde o fenômeno já se encontra estabelecido - GAL'PERIN et al. (1971).GOMES (2006)

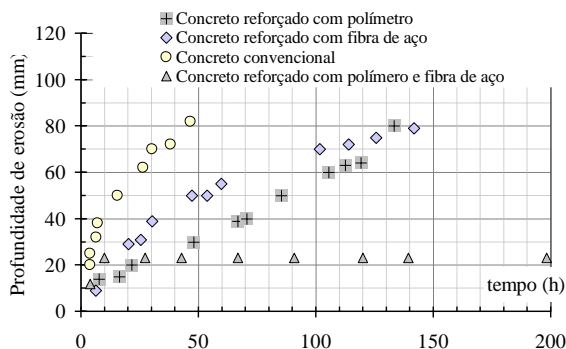


Figura 25 - Influência do tempo de exposição à cavitação na profundidade da fossa de erosão, conforme o tipo de concreto empregado. - HOUGHTON et al. (1978) GOMES (2006)

LOPARDO (1982) em trabalho sobre fluxos macroturbulentos em estruturas hidráulicas ressaltava que a escala de Froude não é adequada para simular corretamente o fenômeno da cavitação. Segundo o autor, existem evidências de que a semelhança dos processos de início de cavitação e de erosão por cavitação só seria possível se o escoamento no modelo e no protótipo tivessem a mesma velocidade. A solução sugerida pelo autor é usar um modelo com semelhança de Froude em escala adequada utilizando-se transdutores de pressão com razoável precisão e confiabilidade e efetuar uma análise estatística detalhada das flutuações de pressão nos pontos conhecidamente críticos do escoamento para se avaliar a tendência à cavitação. O presente trabalho segue esta indicação do autor.

O autor chama a atenção para as seguintes limitações quando se está fazendo a análise do fenômeno da cavitação em escoamentos macroturbulentos:

- Se o modelo indica tendência à cavitação instantânea em um ponto, como esta não é realmente reproduzida em modelo, o campo de pressões que se desenvolve em torno deste ponto não é real,
- Se o modelo indica tendência a cavitação não é possível avaliar os danos que tal fenômeno irá produzir no protótipo.

As verificações realizadas por outros autores sobre o efeito da cavitação indicam que:

- Segundo TOMITA e SHIMA (1986), as ondas de choque podem ser associadas a jatos de velocidades da ordem de 200 m/s e impactos de 300 Mpa.

- BAUR e KONGETER (2001), seguindo outros autores, informaram que se espera efeitos de escala na modelagem de escoamentos onde ocorre o fenômeno da cavitação.

Apesar das conclusões dos autores acima, é possível inferir se ocorrerá cavitação ou não junto à superfície de concreto. Para isto LOPARDO (1996) recomenda o uso das pressões extremas mínimas com probabilidade de não excedência de 0,1% para identificar processos de incipiência à cavitação. Esta probabilidade foi utilizada no presente trabalho.

OLINGER (2001) e OLINGER e BRIGHETTI (2002), considerando pressões medidas na face vertical dos degraus inferiores a -9,0m.c.a. (no protótipo), determinaram velocidades e profundidades relativas (d/k_s) do fluxo que induzissem o aparecimento de fenômenos de cavitação incipiente (Figura 26). Os resultados indicaram uma zona de transição, cujas velocidades médias variaram entre 15 m/s e 35 m/s. Para valores de velocidade acima de 25m/s identificaram em seu experimento que existe o risco de cavitação para todos os valores de d/k_s inferiores a 3,0.

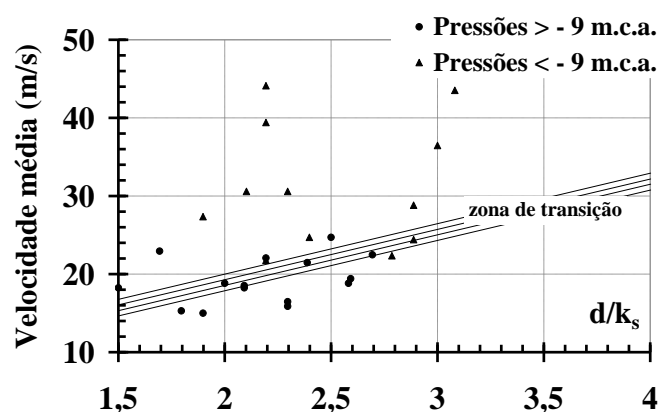


Figura 26 - Condições propícias à cavitação incipiente em vertedouro com declividade 1V:0,75H, degraus de 0,60 m e pressões com probabilidade de 1% de não ocorrência. (Fonte OLINGER e BRIGHETTI, 2002) onde d - profundidade equivalente de água; k_s - rugosidade de forma da superfície do vertedouro

A Tabela 5 apresenta as velocidades a partir da qual há risco de cavitação incipiente definidas por diferentes pesquisadores.

Tabela 5 - Alguns limites de velocidade a partir da qual há risco de cavitação em superfícies de concreto definidos por diversos pesquisadores.

Autor	Velocidades limite para riscos danos por cavitação
BALL (1959)	20 H:1 $V \rightarrow \geq 12$ m/s 50 H:1 $V \rightarrow \geq 28$ m/s 100 H:1 $V \rightarrow \geq 37$ m/s
OLINGER (2001) e OLINGER e BRIGHETTI (2002)	≥ 15 m/s e 35 m/s
BOES e HAGER (2003)	≥ 20 m/s

A Tabela 6 apresenta as vazões específicas a partir das quais se espera que ocorra cavitação nos vertedouros em degraus. Observa-se que não há um consenso entre os diversos autores.

Em função dos estudos realizados em modelos físicos sabe-se que após a aeração do escoamento é quase inexistente o risco de erosão por cavitação nos degraus, em função da existência do ar no escoamento, que protege os degraus.

Tabela 6 - Alguns limites de vazão específica propostos por pesquisadores

Autor	Vazão limite para a ocorrência de:	
	Sem risco de cavitação	Cavitação
TOZZI (1992)	≤ 10 m ³ /s/m	≥ 15 m ³ /s/m
ELVIRO e MATEOS (1996)	≤ 10 m ³ /s/m	-
MATOS et al. (2001)	-	≥ 20 a 30 m ³ /s/m
BOES e HAGER (2003)	-	≥ 25 m ³ /s/m
CHONGGANG (2003) apud AMADOR et al. (2004)	90 m ³ /s/m	-
AMADOR (2005)	$\leq 11,5$ m ³ /s/m	≥ 14 m ³ /s/m
GOMES (2006)	$\leq 11,3$ m ³ /s/m	$\geq 15,6$ m ³ /s/m
OSMAR (2016)	-	≥ 23 m ³ /s/m
NOVAKOSKI et al. (2018)	$\leq 10,6$ m ³ /s/m	$\geq 17,2$ m ³ /s/m
ENDRES et al (2019)	$\leq 9,0$ m ³ /s/m	≥ 17 m ³ /s/m

Os pesquisadores elegem diversas causas para a falta de consenso com relação às diferenças entre os limites de vazões específicas e de velocidades a partir das quais pode ocorrer danos provocados pela cavitação:

- Simplificação na abordagem do problema como o uso apenas da semelhança de Froude nos estudos em modelo,

- Escassez de dados de protótipo com histórico de vazões específicas que ultrapassem os limites da Tabela 6 e que possam corroborar os estudos em modelos físicos.

3.7 Efeito de escala

Como pode ser verificado na bibliografia, os estudos sobre vertedouros em degraus realizados em modelos físicos reduzidos usam a semelhança de Froude, que considera como forças dominantes a gravidade e a inércia, conforme equação abaixo.

$$Fr_{Lref} = \frac{v}{\sqrt{gL_{ref}}} \quad \text{Equação 17}$$

Onde

Fr_{Lref} – Número de Froude

L_{ref} - Comprimento de referência

v - velocidade média.

g - Aceleração da gravidade

Para os fluxos bifásicos (ar e água), a turbulência e a tensão superficial geram forças adicionais descritas pelos números de Reynolds (Re), de Weber (We) e pelo coeficiente de aeração (C_s).

$$Re_{Lref} = \frac{vL_{ref}}{\nu} \quad \text{Equação 18}$$

$$We_{Lref} = \sqrt{\frac{\rho v^2 L_{ref}}{\sigma_w}} \quad \text{Equação 19}$$

$$C_s = \frac{q_a}{q_a + q_w} \quad \text{Equação 20}$$

Onde

ν = viscosidade cinemática;

ρ = densidade da água;

σ_w = tensão superficial entre ar e água;

β = coeficiente de aeração do escoamento;

q_a = vazão específica de ar;

q_w = vazão específica de água.

Usando a profundidade de água h como o comprimento de referência (L_{ref}), o número de Reynolds torna-se $Re = \frac{vh}{\nu} = \frac{q}{\nu}$ e permanece constante ao longo de toda calha.

Para se ter uma similaridade dinâmica total entre modelo e protótipo, as leis de similaridade de Froude, Reynolds e Weber deveriam ser cumpridas simultaneamente. Aplicando a similaridade dinâmica e usando os mesmos fluidos (ar e água), o fluxo turbulento de ar-água não pode ser modelado sem efeitos de escala. A semelhança de Froude leva a que as bolhas de ar sejam muito grandes no modelo, o que resulta em uma maior taxa de caimento e menor capacidade de transporte em comparação com um protótipo (KOBUS 1984). Para a desintegração dos jatos, as gotas de água são maiores no modelo, embora a dispersão do jato seja idêntica (PFISTER e HAGER 2010).

Além das considerações teóricas, se deve seguir valores mínimos de números de Reynolds e Weber a serem considerados no modelo para limitar os efeitos de escala. KOBUS (1984) apresenta algumas destas limitações na tabela abaixo. Para vertedouros em degraus, BOES e HAGER (2003) estudaram perfis de concentração de ar e de velocidade. Eles observaram uma diminuição da concentração de ar próxima ao fundo e um aumento próximo à superfície quando a escala (λ) aumenta.

A

Tabela 7 resume as características mínimas definidas por diversos pesquisadores para limitar os efeitos de escala relacionados à aeração dos vertedores em degrau. Observa-se que os valores limites sugeridos variam muito entre os autores e são referenciados a comprimentos de referência (L_{ref}) variados.

Tabela 7 – Números de Reynolds e de Weber limites para evitar significantes efeitos de escala em modelos físicos de acordo com diferentes autores. (fonte: adaptado de PFISTER e HAGER, 2010, PFISTER e CHANSON, 2014 e TERRIER 2016)

Autor	Limitação	L_{ref}	Aplicação
KOBUS (1984)	$R_o > 1 \times 10^5$	h_o	Local de entrada de ar
PAN E SHAO (1984) apud TERRIER (2016)	$R_o > 3,5 \times 10^6$	L_{jet}	Aeradores, particularmente para β
PINTO (1984) apud TERRIER (2016)	$W_o > 500$	L_{jet}	Aeradores, particularmente para β
KOSCHITZKY (1987)	$R_o > 1 \times 10^5$	h_o	Aeradores, particularmente para β
RUTSCHMANN (1988) apud TERRIER (2016)	$W_o > 110$	h_o	Aeradores, particularmente para β
WAHRHEIT-LESING (1996) apud TERRIER (2016)	$R_o > 7,5 \times 10^5$	h_o	Entrada de ar Vertedouro em degrau
SKRIPALLE (1994) apud TERRIER (2016)	$W_o > 170$	h_o	Aeradores, particularmente para β
BOES (2000)	$R_o > 1 \times 10^5$ $W_o > 100$	h_o	Escoamento bifásico em vertedouro em degraus
CHANSON et al (2004)	$W_o > 100$	h_d	Concentração de ar
TAKAHASHI et al (2005)	$R_o > 1 \times 10^5$	h_o	Perfil da concentração de ar em vertedouro em degraus
PFISTER (2008) apud TERRIER (2016)	$R_o > 2.2 \times 10^5$ $W_o > 140$	h_o	Aeradores, C_T em desenvolvimento
CHANSON (2009)	$R_c > 5 \times 10^5$	h_c	Escoamento auto aerante
PFISTER e HAGER (2010)	$W_o > 140$	h_c	Aeradores, C_T

$$W_o = \frac{V_o}{\left(\frac{\sigma}{\rho L_{ref}}\right)^{0,5}} \quad \text{Equação 21}$$

$$R_o = \frac{V_o L_{ref}}{\nu} \quad \text{Equação 22}$$

$$R_c = \frac{\rho (gh_c^3)^{1/2}}{\mu} \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

R_o =número de Reynolds.

W_o =número de Weber.

h_o = altura de água medida no fim do perfil da ogiva, que coincide com a posição do início dos degraus com altura uniforme (m).

h_c =altura crítica do escoamento.

L_{ref} =comprimento de referência.

L_{jet} =Comprimento do jato.

V_o =velocidade média.

σ =tensão superficial do escoamento.

ρ =massa específica da água.

ν =viscosidade cinemática da água.

μ =viscosidade dinâmica da água.

R_c =número de Reynolds modificado por Chanson (2009).

h_d = altura do degrau.

C_T = concentração de ar total.

β = coeficiente de concentração de ar.

C = coeficiente pontual de ar.

Alguns outros aspectos devem ser considerados na análise do efeito de escala nos valores de pressão:

- BOES e HAGER (2003) em seu artigo sobre as características dos escoamentos sobre vertedouros em degraus recomendam que para se excluir efeitos de escala em modelos físicos de vertedouros em degraus, o número de Reynolds deve ser superior a 10^5 e o número de Weber mínimo deve ser 100. Para vertedouros com altura de degrau de 0,60m a escala máxima exigida é de 1:15.
- TEIXEIRA et al. (2012) observou que as pressões médias junto ao fundo de lajes de dissipadores de energia, onde ocorre o ressalto hidráulico, são praticamente as mesmas quando transportadas para protótipo, ou seja, não apresentam efeito de escala. Entretanto, as pressões extremas nos modelos são mais críticas do que as de protótipo devido à menor quantidade de ar existente nos modelos. A maior quantidade de ar no protótipo resultaria em um “amortecimento” maior nas pressões extremas. Estas conclusões foram baseadas em estudos de modelos com diferentes escalas (1:100, 1:80, 1:50 e 1:32 e 1:1).

- PFISTER e HAGER (2014); PFISTER e CHANSON (2014) sugerem que:
Para $Fr \geq 5$ é suficiente $Re \geq 2 * 10^5$ para minimizar os efeitos de escala, uma vez que o limite do número de Weber é implicitamente respeitado,
Para $Fr < 5$ deve-se selecionar o número de Weber.

No presente estudo considerou-se as limitações indicadas por BOES (2000) de número de Reynolds superior a 1×10^5 , de CHANSON et al (2008), de We superior a 100 e que todos os experimentos analisados neste trabalho estão na escala 1:10 para garantir as condições de fluxos bifásicos.

4 METODOLOGIA

A seguir é apresentada a metodologia da pesquisa realizada para atender ao objetivo principal desta tese que é desenvolver processos e metodologias de análise dos dados experimentais de pressões dinâmicas ao longo da calha de vertedouros em degraus. O trabalho visou caracterizar a macroturbulência do escoamento e a distribuição longitudinal das pressões extremas atuantes junto às quinas dos degraus ao longo da calha com aeração natural. Nos espelhos foram analisadas as pressões extremas mínimas, por ser uma região mais sujeita à ocorrência do fenômeno da cavitação. Nos patamares foram analisadas as pressões extremas máximas, por ser uma região sujeita ao impacto direto do escoamento, que tem um maior potencial de sofrer danos por desgaste, erosão e cavitação. Para isso foi necessário desenvolver as seguintes atividades:

- a) Aquisição e análise de dados foi feita em três modelos em operação, dois no LOH/IPH e um no LAHE.
 - Análise dos dados brutos.
 - Análise adimensional dos dados.
- b) Busca na literatura por dados de outros autores,
 - Análise dos dados brutos.
 - Análise adimensional dos dados.
- c) Análise e comparação dos seguintes dados:
 - Três modelos entre si.
 - Três modelos com outros autores.
 - Determinação das situações crítica para o espelho e o patamar.
 - Definição de equações de previsão de pressão.

4.1 Aquisição e análise de dados nos modelos em operação LOH I, LOH II e LAHE

4.1.1 Características gerais dos modelos

A coleta dos dados de pressão “instantânea” e da posição de início da aeração foi realizada nos três modelos físicos de vertedouros em degraus, sendo dois disponíveis no Laboratório de Obras Hidráulicas IPH/UFRGS e denominados LOH I e LOH II e um modelo denominado LAHE localizado no Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS. A Figura 27; Figura 28 e Figura 29 ilustram cada um dos

referidos modelo. Na Figura 30 é apresentado um esquema das três calhas. A Figura 31 apresenta a posição das tomadas nas proximidades das quinas dos degraus nos três modelos.

Na Tabela 8 encontram-se as características gerais de cada um dos modelos apresentados. A Figura 32 ilustra os parâmetros apresentados na Tabela 8. Na Tabela 9 são apresentados as vazões ensaiadas e os respectivos números de Froude rugosos do escoamento.



Figura 27 - Vistas do modelo físico LOH I.



Figura 28 - Vistas do modelo físico LOH II.



Figura 29 - Vistas do modelo físico LAHE.

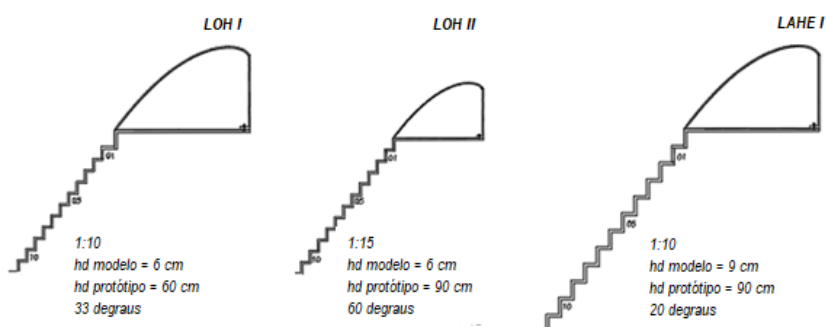


Figura 30 - Esquemas das calhas dos modelos estudados em suas respectivas escalas (h_d = altura do degrau).

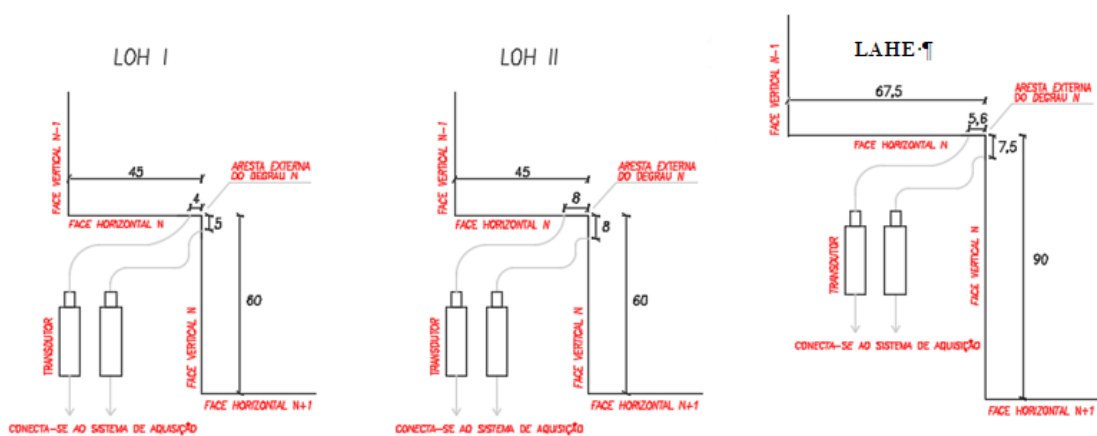


Figura 31 - Pontos de medição nas quinas dos degraus nos modelos LOH I, LOH II e LAHE. (unidades em mm)

Tabela 8 - Características dos modelos físicos (ver Figura 31 e Figura 32)

Características		Símbolo	LOH I	LOH II	LAHE I	Unidade
Escala		λ	1:10	1:10	1:10	-
Altura do vertedouro		Y_t	2,45	4,6	2,30	(m)
Altura do degrau		h_d	0,06	0,06	0,09	(m)
Altura da ogiva	A montante ¹	y_m	0,610	0,290	0,610	(m)
	A jusante ²	y_j	0,440	0,290	0,440	(m)
Rugosidade do degrau		K	0,036	0,036	0,054	(m)
Hipotenusa do degrau		d_L	0,075	0,075	0,113	(m)
Comprimento da ogiva		L_o	0,78	0,52	0,78	(m)
Largura do vertedouro		B	0,40	0,50	1,15	(m)
Declividade da calha (1V:mH)		-	1:00V:0,75H	1:00V:0,75H	1:00V:0,75H	-
Número de degraus		N_d	33	60	20	-
Faixa de Vazões específicas ensaiadas		q	0,100 a 0,368	0,054 a 0,436	0,100 a 0,356	m ³ /s/m
Faixa de Número de Froude rugoso		F^*	5,2 a 19,2	2,8 a 22,8	2,8 a 10,1	-
Faixa de Número de Reynolds (10 ⁵)		Re	1,00 a 3,00	0,50 a 5,00	0,99 a 3,04	-
Faixa de Número de Weber		We	219 a 468	181 a 469	234 a 541	
Posição relativa da tomada no espelho ³		h_t/h_d	0,92	0,87	0,92	-
Posição relativa da tomada no patamar ⁴		l_t/l_d	0,91	0,82	0,92	-

¹ medida a partir da crista até o fundo montante do vertedouro

² medida a partir da crista até o início do espelho do 1º degrau.

³ relação entre a distância a partir da base do patamar até a quina do espelho (h_t) e a altura do mesmo (h_d)

⁴ relação entre a distância a partir da parte inferior do espelho até a quina do patamar (l_t) e a base do mesmo (l_d)

A Figura 32 ilustra os parâmetros apresentados na Tabela 8.

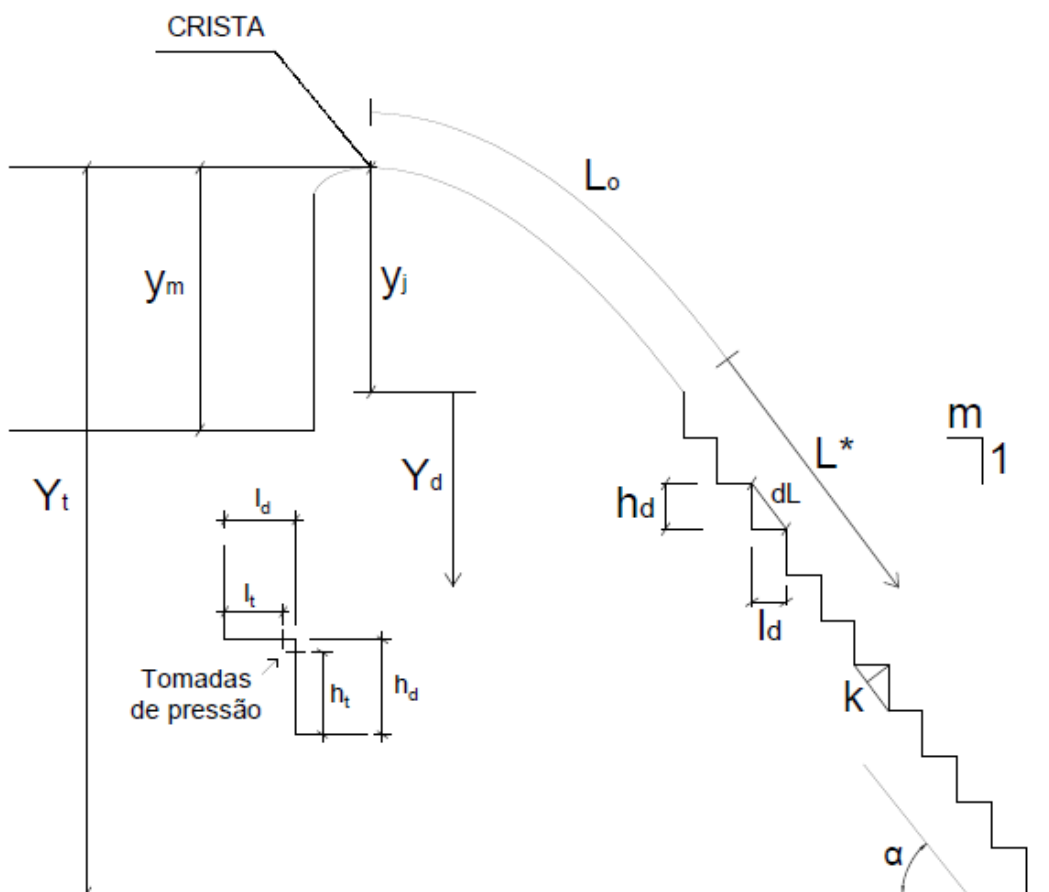


Figura 32 - Esquema dos parâmetros dos modelos LOH I, LOH II e LAHE apresentados na Tabela 8

Tabela 9 - Vazões específicas em cada modelo e os seus números de Froude rugosos (F^*).

LOH I			LOH II			LAHE		
Q (l/s)	q (m ³ /s/m)	F^*	Q (l/s)	q (m ³ /s/m)	F^*	Q (l/s)	q (m ³ /s/m)	F^*
-	-	-	27	0,054	2,8	-	-	-
-	-	-	41	0,082	4,3	-	-	-
40	0,100	5,2	54	0,108	5,6	115	0,100	2,8
50	0,125	6,5	-	-	-	144	0,125	3,5
60	0,150	7,8	75	0,150	7,8	173	0,150	4,2
80	0,200	10,5	100	0,200	10,5	230	0,200	5,6
100	0,250	13,1	125	0,250	13,06	-	-	-
110	0,275	14,4	-	-	-	316	0,275	7,8
-	-	-	150	0,300	15,7	-	-	-
132	0,330	17,3	-	-	-	380	0,330	9,4
140	0,350	18,3	-	-	-	-	-	-
147	0,368	19,2	-	-	-	409	0,356	10,1
-	-	-	200	0,400	20,9	-	-	-
-	-	-	218	0,436	22,8	-	-	-

LOH I			LOH II			LAHE		
Q (l/s)	q (m³/s/m)	F*	Q (l/s)	q (m³/s/m)	F*	Q (l/s)	q (m³/s/m)	F*
-	-	-	250	0,500	30,8	-	-	-

A análise do efeito de escala que os diferentes ensaios poderiam apresentar na comparação das pressões ao longo do perfil longitudinal e a sua transposição para o protótipo se baseou nas condições sugeridas por BOES (2000), CHANSON ET AL (2004) E TAKAHASHI e OHTSU (2005), conforme apresentado no item 3.7 e nas tabelas 8 e 9 por serem os que se referem a aplicação em vertedouros em degraus, ou seja:

- $We \geq 100$;
- $Re \geq 10^5$
- Todos os experimentos analisados neste trabalho estão na escala 1:10 para garantir as condições de fluxos bifásicos

4.1.2 Coleta de Dados de Pressões

Os dados de pressões “instantâneas” ao longo da calha em degraus nos três modelos foram adquiridos através de transdutores. Nos espelhos e patamares onde não se tinha transdutores foram feitas medidas com piezômetros (pressões médias).

As tomadas de pressão foram instaladas nas quinas dos degraus, como mostra a Figura 31, tanto no patamar como no espelho. A Tabela 10 apresenta um resumo das principais características da obtenção das amostras de dados de pressões.

Tabela 10– Principais características das amostras adquiridas nos modelos.

Características	Símbolo	LOH I	LOH II	LAHE I	Unidade
Escala	-	1:10	1:10	1:10	-
Degraus instrumentados	-	2 ao 28	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 20, 25, 29, 40, 46 e 51	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15 e 16.	-
Tempo de aquisição	t_a	10	10	10	min
Frequência de aquisição	f_a	100	100	100	Hz
Faixa dos transdutores	-	-1,5 a 2,5 -1 a 4 - 2,13 a 4,3 - 0,7 a 0,7 -3 a 3 - 2,13 a 2,13	-1 a 1 -2,13 a 2,13 -2,5 a 2,5 2,13 a 4,3 -0,7 a 2,13 - 5 a 5 -1 a 4	-1,4 a 2,8 -1,4 a 4,3	psi

Características	Símbolo	LOH I	LOH II	LAHE I	Unidade
			-2,13 a 4,3		
Marca dos transdutores	-	Zurich, Sitron e Instrutemp	Ômega e Sitron	Zurich	-

As mangueiras de nylon utilizadas para conectar os transdutores às tomadas possuíam um comprimento de 23 cm e diâmetro interno de 3 mm. Os tamanhos das mangueiras obedeceram às recomendações de LOPARDO (1987), entretanto, independentemente disto foi feita uma análise sobre a influência do comprimento da mangueira nos resultados onde se constatou que este tamanho de mangueira não apresentava alterações nos resultados. A análise está apresentada em PRESTES (2019).

4.1.2.1 Medições com transdutores de pressão no LOH I

Os ensaios com transdutores no modelo LOH I foram realizados em duas diferentes configurações em função da limitação do número de transdutores (os degraus pares e ímpares foram medidos separadamente devido a não se ter transdutores suficientes para medição simultânea), com o objetivo de se obter um maior número de informações a partir dos dados (Figura 33).



Figura 33 - Transdutores instalados no modelo LOH I.

O Anexo A apresenta os degraus medidos em cada uma das duas configurações (par e ímpar), a tabela 10 mostra as faixas de operação dos transdutores utilizados. Alguns degraus foram mantidos fixos nas duas configurações, para permitir um controle. A aquisição dos dados foi feita simultaneamente em todos os transdutores com uma frequência de 100 Hz e com duração de 10 minutos. O tempo e a frequência de aquisição obedeceram às recomendações de LOPARDO

(1987). Neste caso também foi feita uma análise sobre a influência do tempo e da frequência nos resultados, onde se constatou que o tempo de 10 min de coleta e a frequência de 100 Hz eram suficientes para representar o fenômeno

4.1.2.2 Medições com transdutores de pressão no LOH II

Os ensaios com transdutores no modelo LOH II foram realizados também em duas diferentes configurações (degraus pares e ímpares medidos separadamente). O Anexo B apresenta os degraus medidos em cada uma das duas configurações, a tabela 10 mostra as faixas de operação dos transdutores utilizados. Alguns degraus foram mantidos fixos nas duas configurações, para permitir um controle. A aquisição dos dados foi feita simultaneamente em todos os transdutores com uma frequência de 100 Hz e com duração de 10 minutos. A Figura 34 apresenta os transdutores instalados no modelo LOH II.



Figura 34 - Transdutores instalados no modelo LOH II.

4.1.2.3 Medições com transdutores de pressão no LAHE

As medições no modelo LAHE foram realizadas com transdutores de pressão. A tabela 10 mostra as faixas de operação de cada transdutor utilizado. Os dados foram adquiridos através de um sistema de aquisição de dados modular e integrado da marca LYNX Tecnologia com o auxílio do software AqDados 7.02, também da LYNX Tecnologia, conectado a um microcomputador. A aquisição dos dados foi feita simultaneamente em todos os transdutores a uma frequência de 100 Hz e com duração de 10 minutos. A Figura 35 apresenta a instalação dos transdutores na parte posterior do modelo físico LAHE.



Figura 35- Transdutores instalados no modelo LAHE.

4.2 Busca na literatura por dados de outros autores

Na literatura se buscou dados de pressões “extremas” e médias em vertedouros em degraus em trabalhos de outros autores. Foram encontrados seis autores que mediram pressões “instantâneas” nos degraus, estes dados foram utilizados na análise comparativa com os dados utilizados nesta pesquisa.

- a) SÁNCHEZ (2001);
- b) SANAGIOTTO (2003) e GOMES (2006);
- c) DAI PRÁ (2004);
- d) AMADOR (2005);
- e) CONTERATO (2011).

Através da análise das figuras e das informações do Anexo D se pode observar que as características físicas dos vertedouros em degraus utilizados pelos diferentes autores foram:

- Declividades (1,00V:mH) - 1,00V:0,75H, 1,00V:0,80H e 1,00V:1,00H.
- Alturas de degraus (h_d) - 5, 6, 7, 9 e 10cm.
- Diferentes formas de ogivas – desde sem ogiva (degraus desde o início) até ogiva com altura (y_i) de 0,44m (perfil Creager).

- Diferentes posições relativas de medição de pressão no interior do espelho - relação entre a distância a partir da base do patamar até a quina do espelho (h_t) e a altura do mesmo (h_d) - variou de $0,50 \leq h_t/h_d \leq 0,96$.
- Diferentes posições relativas de medição de pressão no interior do patamar - relação entre a distância a partir do espelho até a quina do patamar (l_t) e o comprimento da base do mesmo (l_d) variou de $0,50 \leq l_t/l_d \leq 0,96$.
- Vazões específicas (q) variando entre 0,02 e 0,7 m³/s/m.
- Número de Froude rugoso (F^*) variando entre 2,3 e 36,8.

Em função das diferenças construtivas e de medições entre os estudos só foram analisadas as pressões mais próximas da quina dos degraus uma vez que, devido ao descolamento do escoamento, é onde ocorrem as maiores e menores pressões. Julga-se que as diferenças encontradas entre os estudos se devem principalmente aos seguintes efeitos de laboratórios:

- Medição de pressão em posições relativas diferentes.
- Diferentes diâmetros das tomadas de pressão.
- Diferentes características dos transdutores (precisão, erro em relação ao fundo de escala).
- Diferentes formas de como foi feita a medição com o transdutor, faceado no degrau ou com conduto de adaptação. Quando a medição é feita com conduto de adaptação a leitura é mais “pontual” e tende a ter maior amplitude, enquanto áreas maiores de medição tendem a atenuar as pressões.
- Diferentes comprimentos das mangueiras, quando utilizadas.
- Diferentes adaptadores aos transdutores.
- Diferentes acabamentos das tomadas.

Salienta-se que a diferença entre as medições feitas nos estudos dos vários autores deve ser considerada quando da análise dos resultados, uma vez que nos espelhos esta variação pode chegar a até três vezes o valor da pressão medida, podendo inclusive mudar de sinal, conforme dados de OLINGER (2001) e SANAGIOTTO (2003).

Em função das diferenças conhecidas e desconhecidas dos dados dos autores citados acima, a base do presente estudo está apoiada nos dados dos três modelos em operação na pesquisa (LOH I, LOH II e LAHE), uma vez que nestes a autora tem

maior conhecimento das características geométricas das estruturas, da montagem dos experimentos, da realização dos ensaios e das técnicas de aquisição dos dados.

Os dados dos demais autores foram utilizados para verificação de tendências de comportamento das características macro turbulenta do escoamento nos três modelos base. No anexo D apresenta-se as características dos modelos destes autores.

4.3 Considerações sobre os modelos físicos utilizados

Encontra-se apresentado a seguir um resumo das principais diferenças físicas entre os três modelos que foram base para a pesquisa que originou este trabalho:

- Os modelos LOH I e LAHE possuem a mesma ogiva, mas com tamanhos de degraus diferentes (6 e 9 cm respectivamente), isto permite analisar a influência da altura do degrau nas características do escoamento.
- O modelo LOH II possui degraus de 6 cm e a ogiva 1,5 vezes menor que a do modelo LAHE e LOH I, desta forma:
 - a) a comparação do modelo LOH I com o LOH II permite verificar a influência do tamanho da ogiva no escoamento;
 - b) a comparação dos modelos LOH II e LAHE permite verificar a influência do tamanho da ogiva e da altura do degrau no escoamento.

4.4 Considerações gerais sobre as pressões analisadas

Como já foi explicado no item pressões instantâneas na revisão bibliográfica, o tipo de escoamento que ocorre em uma calha de um vertedouro em degraus apresenta um processo de dissipação de energia que é acompanhado por flutuações repentinas de pressão, que podem causar danos à estrutura (fadiga, vibração, cavitação ou erosão/desgaste).

A ocorrência de pressões extremas máximas acima de certos valores pode ocasionar esforços de compressão e danos nas superfícies do degrau (desgastes/erosão) em função da expulsão de partículas do concreto.

As pressões extremas mínimas podem provocar danos (erosão/cavitação) em função de esforços de tração (pressões menores que zero). Quando estas chegam a valores próximos do valor da pressão de vapor da água podem provocar o fenômeno da cavitação, resultando em esforços de compressão muito elevados e também danificando o concreto da superfície sólida.

Em um vertedouro em degraus estas pressões são mais críticas nas proximidades das quinas dos degraus.

Diversos pesquisadores estudaram as pressões ao longo da calha de vertedouros em degraus e mostraram que, de maneira geral, as pressões negativas mais significativas aparecem nas faces verticais dos degraus, sendo a sua extremidade superior àquela região onde se espera as pressões negativas com maiores magnitudes. As pressões positivas mais severas aparecem na face horizontal (patamar), na região de impacto do jato (AMADOR; SÁNCHEZ-JUNY; DOLZ, 2009; ARANTES, 2007; CHEN; DAI; LIU, 2002; LOBOSCO; SCHULZ, 2010; GOMES, 2006).

SANAGIOTTO (2003) apresenta dados de pressão média em espelhos e patamares para um vertedouro com calha 1,0V:0,75H. A autora concluiu que as pressões médias máximas e mínimas ocorrem nos pontos mais próximos das arestas externas do patamar e do espelho, respectivamente.

DAI PRÁ et al. (2012) apresentam um estudo semelhante ao de SANAGIOTTO (2003), mas, para um vertedouro com calha com declividade 1,0V:1,0H. Os autores chegaram a resultados muito semelhantes aos de SANAGIOTTO (2003) e TOZZI (1992) no que se refere ao comportamento das pressões médias nas faces dos degraus, indicando que, independente da declividade da calha, as pressões médias se comportam de forma semelhante, principalmente quanto à localização nos degraus (espelho e patamar) das pressões médias máximas e mínimas.

ZHANG, CHEN E WANG (2012) estudaram as pressões dentro dos degraus nas regiões não aerada e gradualmente aerada do escoamento. Nos patamares, os autores observaram uma variação das pressões na forma de um “S”, de forma que as pressões mais extremas se encontram próximas das quinas dos espelhos e patamares.

O presente trabalho se concentrou na análise das características macrotubulentas do escoamento em vertedouros em degraus a partir da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas e máximas que ocorrem junto às quinas dos degraus (patamares e espelho) de maneira a prever se podem ocorrer danos na estrutura em função das características do escoamento. Do ponto de vista matemático, as flutuações de pressão de um escoamento real podem ser estudadas como um processo estocástico, estacionário e ergódico. Isso nos permite avaliar suas

propriedades de acordo com uma única amostra. As características de amplitude e frequência são definidas para cada amostra de flutuação de pressão.

Não há um consenso sobre qual deve ser o valor a ser usado para representar as pressões extremas mínimas e máximas quando elas são obtidas em modelos físicos. Alguns autores utilizam as probabilidades de 1% ou 5% de não excedência para representar as pressões extremas mínimas e 95% ou 99% para representar as pressões extremas máximas que podem ocorrer no escoamento (SÁNCHEZ 2001 e AMADOR 2005). Neste trabalho se optou pela probabilidade de 0,1% de não excedência para representar os valores de pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%/\gamma}$) e pela probabilidade 99,9 % de não excedência para representar os valores de pressões extremas máximas ($P_{99,9\%/\gamma}$), ficando a favor da segurança na estimativa das pressões. Esta escolha foi feita com base nas informações apresentadas nos trabalhos de LOPARDO, R.A., BACCHIEGA, J.D., LOPARDO, M.C, FATTOR, C.A., MARMONTI, I. Y BERNARDO, T. (2014) e TEIXEIRA, E.D. (2012). Estes trabalhos indicam que os modelos físicos com semelhança de Froude são adequados para inferir as pressões que podem provocar riscos de cavitação por pulsos de pressão no protótipo. No primeiro trabalho os autores apresentaram a comparação entre os resultados de pressão obtidos na bacia de dissipação da barragem de Salto Grande (Argentina/Uruguai). Através desta comparação foi possível verificar que no modelo físico o valor com $P_{0,1\%/\gamma}$ de atingir a pressão de vapor do líquido em escala leva a uma “tendência à cavitação no protótipo” e que com maiores probabilidades de ocorrência de superação desse valor negativo, os autores detectaram sinais de erosão por cavitação intermitente em estruturas de concreto armado em protótipo (LOPARDO, R.A, DE LIO, J.C E VERNET, G.F, (1984)). A escolha das pressões $P_{99,9\%/\gamma}$ e $P_{0,1\%/\gamma}$ foi feita para determinar a pressão máxima e mínima de referência, que surge da curva de probabilidade acumulada de ocorrência em função das amplitudes de flutuação de pressão. O valor da pressão instantânea máxima resulta então da consideração do valor médio da pressão no ponto (pressão estática) acrescido de sua deflexão positiva com uma probabilidade de ocorrência de 99,9%. Enquanto o valor da pressão instantânea mínima resulta da consideração do valor médio da pressão no ponto (pressão estática) diminuído de sua deflexão negativa com uma probabilidade de ocorrência de 0,1%.

Esses valores foram escolhidos para se definir os extremos de pressão positiva e negativa de um registro de amostras de 10 minutos a 100 Hz, em que o fenômeno pode ser considerado estacionário e ergódico.

O fenômeno da cavitação por pulsos de pressão pode ocorrer sem altas velocidades ou depressões médias muito pronunciadas. Por outro lado, para que ocorra a implosão da bolha, não é necessário deslocar a cavidade em direção a áreas de maior pressão, pois a variação da pressão ocorre no mesmo local. Além disso, a presença de descontinuidades estruturais em fluxos macro-turbulentos (às vezes causados para se obter maior eficiência em termos de dissipação de energia, como é o caso do vertedouro em degraus) também pode aumentar as amplitudes de flutuação de pressão, correlação espacial e concentração de energia em torno de uma frequência dominante. Portanto, o uso de algum parâmetro estatístico derivado de uma hipótese gaussiana, não é suficiente para obter uma descrição correta do fenômeno de tendência à cavitação intermitente.

A comparação de resultados de protótipos com resultados de laboratório permite admitir que um valor representativo para a análise da cavitação por pulso de pressão é a semi-amplitude negativa $P_{0,1\%/\gamma}$, com probabilidade de 0,1% de ser excedida por valores mais negativos, conforme apresentado por LOPARDO, RA, (1996).

Recentemente LOPARDO, RA, BACCHIEGA, JD, LOPARDO, MC, FATTOR, CA, MARMONTI, I. e BERNARDO, T., (2014) analisando os locais no vertedouro de Gatún (no canal do Panamá, rio de Chagres/ Panamá) que apresentaram danos (picaduras) na superfície dos “chute Blocks” e dos pilares e os comparando com os locais onde as pressões $P_{0,1\%/\gamma}$ obtidas no modelo físico indicavam estarem próximos das pressões de vapor transformadas para escala de protótipo eram praticamente os mesmos. Cabe salientar que este vertedouro operou por mais de um século tendo escoado vazões superiores às de projeto.

O exposto acima mostra que o valor de $P_{0,1\%/\gamma}$ dos modelos quando transposto para o protótipo pode indicar “tendência de cavitação” no protótipo se este valor atingir o valor da pressão de vapor da água.

$$(P_{0,1\%/\gamma}) \cdot \lambda \leq P_{\text{vapor}/\gamma} = -10,2 \text{ m.c.a.} \Rightarrow \text{“tendência de cavitação”}$$

O mesmo raciocínio foi adotado para as pressões extremas máximas onde foi considerado como representativo o valor de $P_{99,9\%/\gamma}$.

5 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS MACRO TURBULENTAS

Conforme mencionado anteriormente, o presente trabalho utiliza dados do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Pré-Aeração” onde foram estudadas as distribuições longitudinais das pressões médias, flutuações de pressões e pressões extremas mínimas e máximas, junto à quina dos degraus, com diferentes probabilidades de não excedência. Este projeto de pesquisa e desenvolvimento foi feito sob a supervisão da autora e os dados brutos estão apresentados nos relatórios IPH/UFRGS 2018 e IPH/UFRGS 2019.

Esta tese abordou a análise da distribuição longitudinal das pressões extremas encontradas nos ensaios realizados com aeração natural para o citado projeto de pesquisa.

5.1 Análise Visual da Posição de Início de Aeração

A posição de início da aeração é uma característica de possível identificação visual no escoamento, mas de difícil precisão em função da dinâmica do escoamento. Por este motivo, a verificação da posição de início da aeração do escoamento foi feita segundo dois critérios:

- Determinação visual seguindo estudos realizados por MATOS (1999), POVH (2000), CHANSON (2008) entre outros.
- Determinação pelas pressões extremas mínimas de acordo com pesquisa realizada por AMADOR (2005) e GOMES (2006).

No critério de determinação visual, os pontos de início da aeração (L_a) foram definidos por observação visual através da análise do comportamento do escoamento, e foram divididos em:

- Início da aeração intermitente - corresponde ao ponto em que o ar começa a ser inserido no escoamento em pontos esparsos da largura da calha (Figura 36, Figura 38 e Figura 40).
- Início da aeração total - corresponde ao local em que a aeração ocorre na totalidade da largura da calha (Figura 37, Figura 39 e Figura 41).



Ponto de início da aeração intermitente

Figura 36- Ponto de início da aeração intermitente no Modelo LOH I.



Ponto de início da aeração total

Figura 37 - Ponto de início da aeração total no Modelo LOH I.



Ponto de início de aeração intermitente

Figura 38 - Ponto de início da aeração intermitente no Modelo LOH II.



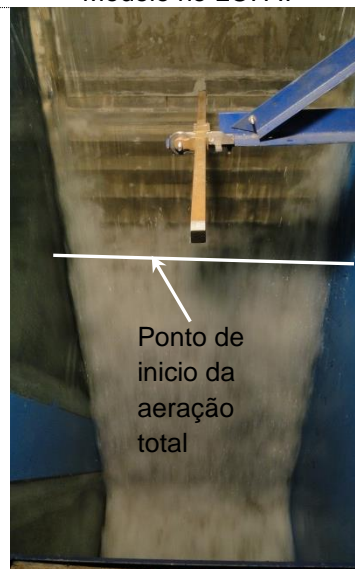
Ponto de início de aeração total

Figura 39 - Ponto de início da aeração total Modelo no LOH II



Ponto de início da aeração intermitente

Figura 40 - Ponto de início da aeração intermitente no Modelo LAHE.



Ponto de início da aeração total

Figura 41 - Ponto de início da aeração total no Modelo LAHE.

O segundo critério para determinação do início da aeração foi feito pela análise da distribuição longitudinal das pressões mínimas na calha. Segundo AMADOR (2005) e GOMES (2006), o início da aeração ocorre próximo do local onde acontece a menor pressão na calha do vertedouro (espelho).

A determinação visual aqui apresentada segue o critério mais tradicional de analisar a posição de início de aeração do escoamento sobre vertedouros em degraus, dividindo o mesmo em uma zona sem aeração (a montante) e uma zona com aeração (parcial ou total) a jusante.

A Figura 42 apresenta esquematicamente este critério definindo as posições de início da aeração (L_a) considerando a extensão da ogiva lisa (L_o) e considerando apenas a distância a partir do início dos degraus (L_v^*).

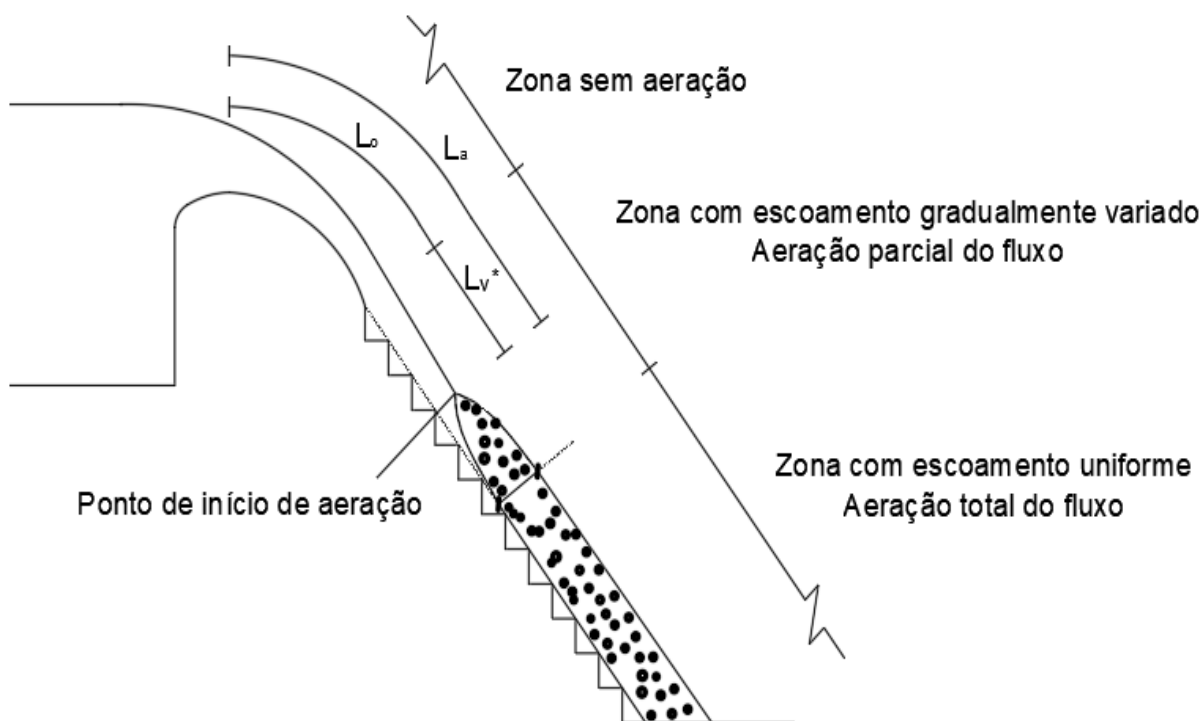


Figura 42 - Definição do início da aeração considerando a extensão da ogiva ($L_a = L_o + L_v^*$) e a posição do início da aeração a partir do início dos degraus (L_v^*).

Os resultados da posição de início da aeração a partir do início dos degraus (L_v^*) e considerando a extensão da ogiva (L_a) para os três modelos (LOH I, LOH II e LAHE) através da análise visual estão apresentados no Anexo E.

Na Figura 43 estão apresentados os dados brutos encontrados para o início da aeração medidos a partir da crista do vertedouro (L_a) em função da vazão específica (q).

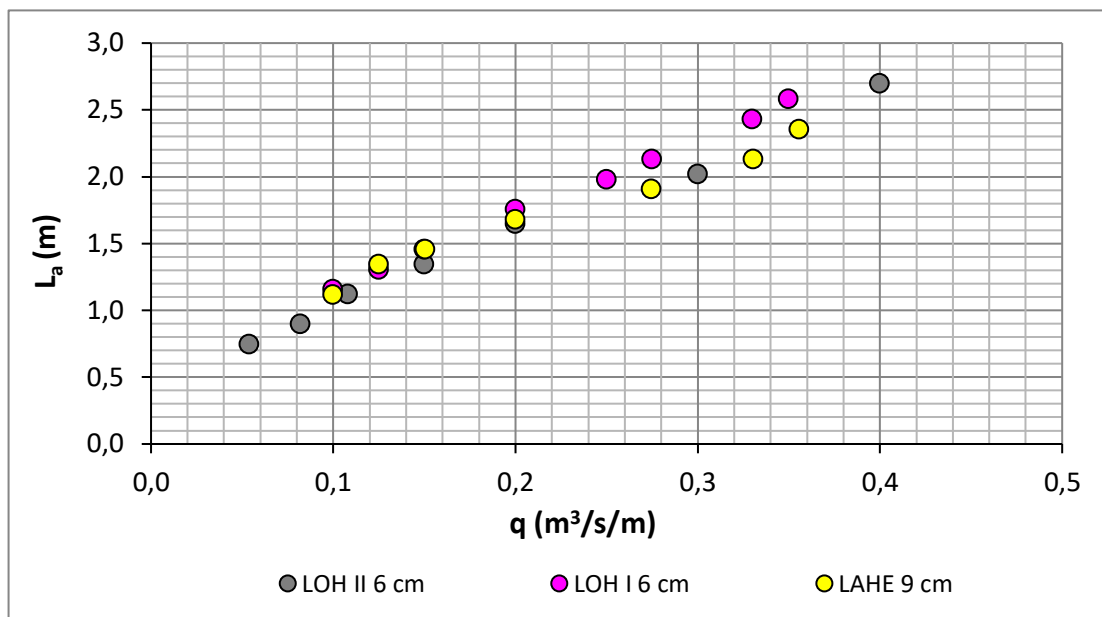


Figura 43 - Posição do início de aeração por determinação visual considerando a extensão da ogiva (L_a) em função da vazão específica (q) para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.

Pode-se observar que:

- Independente das características físicas dos três modelos, o início da aeração (L_a) cresce de forma linear com o aumento da vazão específica (q).
- A comparação do modelo LAHE com o modelo LOH I, que possuem mesma ogiva (forma, altura e comprimento), só se diferenciando pela altura do degrau ($h_d = 0,09m$ e $0,06 m$), permite verificar a influência da altura do degrau (ou da rugosidade do degrau) no comprimento de início de aeração (L_a). Observa-se que o modelo LOH I que tem altura de degrau (h_d) menor precisa de um comprimento maior para aerar. Esta conclusão já havia sido verificada por diferentes autores podendo-se citar SANAGIOTTO (2003) e DAI PRÁ (2004);
- Na comparação do modelo LOH I e LOH II, que tem mesma altura de degrau (h_d) mas alturas de ogiva diferentes, se observa que o modelo LOH II, com menor ogiva precisa de menor comprimento de aeração (L_a), indicando que o comprimento da ogiva tem uma influência, que cresce com o aumento da vazão. O efeito da rugosidade do degrau é muito superior ao efeito do comprimento da ogiva uma vez que a rugosidade da ogiva é menor.

- Na comparação do modelo LAHE e LOH II, que tem diferentes alturas de degrau (h_d) e diferentes alturas de ogiva, se observa que o desenvolvimento do L_a é similar. Aparentemente, a influência do aumento do degrau é compensada pela diminuição do tamanho da ogiva.

As observações acima levam a uma dúvida sobre a influência da ogiva no comprimento da aeração. Como existe um consenso na literatura sobre a influência da altura do degrau na posição de início da aeração, onde o aumento do mesmo leva a uma diminuição do comprimento de aeração, passou-se a fazer uma análise da influência da ogiva através da análise da espessura da camada limite (δ).

Foi utilizada a equação de desenvolvimento da camada limite (δ) proposta pelo US Army Corps of Engineers (1977) para o cálculo da espessura da camada limite (δ) no final da ogiva dos modelos utilizados – LOH I, LOH II e LAHE. A mesma varia entre 0,005 m e 0,007 m para a faixa de vazões ensaiadas e a sua influência no comprimento do início da aeração (L_a) é inversamente proporcional à vazão específica (q) e à altura de água no final da ogiva (h_o). Ou seja, a maior influência da ogiva seria para as vazões menores que aeram mais rápido e são menos críticas quanto aos danos na estrutura. A rugosidade do degrau é muito superior à rugosidade da ogiva, desta forma o efeito da rugosidade do degrau na aeração é maior do que o efeito do comprimento da ogiva. A Tabela 11 apresenta as características consideradas para esta conclusão.

$$\frac{\delta}{x} = 0,08 \left(\frac{x}{k_s} \right)^{-0,233} \quad \text{Equação 24}$$

Onde

δ = espessura da camada limite no ponto x (m)

x = distância na ogiva até o ponto de determinação de δ (m)

k_s = rugosidade da superfície (m)

Tabela 11- Características consideradas para verificação da influência da rugosidade do degrau no desenvolvimento da camada limite.

Característica	Unid.	Modelo		
		LOH I	LOH II	LAHE
Altura do degrau (h_d)	m	0,06	0,06	0,09
Comprimento da superfície da ogiva (L_o)	m	0,78	0,52	0,78

Característica	Unid.	Modelo		
		LOH I	LOH II	LAHE
Rugosidade da superfície da ogiva (k_o)	mm	0,06	0,06	0,03
Espessura da camada limite no fim da ogiva (δ)	m	0.007	0.005	0.007
Espessura da lâmina de água no fim da ogiva (h_o)	m	$\approx 0,030$ a $\approx 0,096$	$\approx 0,030$ a $\approx 0,094$	$\approx 0,030$ a $\approx 0,096$
δ/h_o	-	$\approx 0,230$ a $\approx 0,072$	$\approx 0,254$ a $\approx 0,04$	$\approx 0,230$ a $\approx 0,073$
Rugosidade do degrau (k)	mm	36	36	54
k/k_o	-	600	600	1.800

Em função do exposto acima e com o objetivo de simplificar a determinação do comprimento do início da aeração em função das diferentes características dos modelos ensaiados pelos demais autores se optou por analisar o comprimento do início da aeração a partir do início dos degraus (L^*), desprezando a parte da ogiva, uma vez que a influência do comprimento da ogiva lisa é praticamente insignificante. Ainda que ela tenha alguma influência, a mesma se manifestará mais intensamente nas menores vazões, que aeram mais cedo.

Na Figura 44 foi analisada a posição de início da aeração determinada visualmente considerando a posição a partir do 1º degrau (L_v^*). Observou-se que:

- Vertedouros com degraus de mesma altura possuem praticamente mesmo comprimento de aeração, (Modelo LOH I x LOH II).
- Vertedouros com degraus maiores tem menor comprimento de aeração (comparando modelo LOH I com LAHE e modelo LOH II com LAHE) sendo a variação absoluta do comprimento de aeração (L_v^*) tendencialmente maior à medida que a vazão aumenta. Esta constatação já havia sido feita por outros autores, entre eles SANAGIOTTO (2003) e DAI PRÁ (2004).

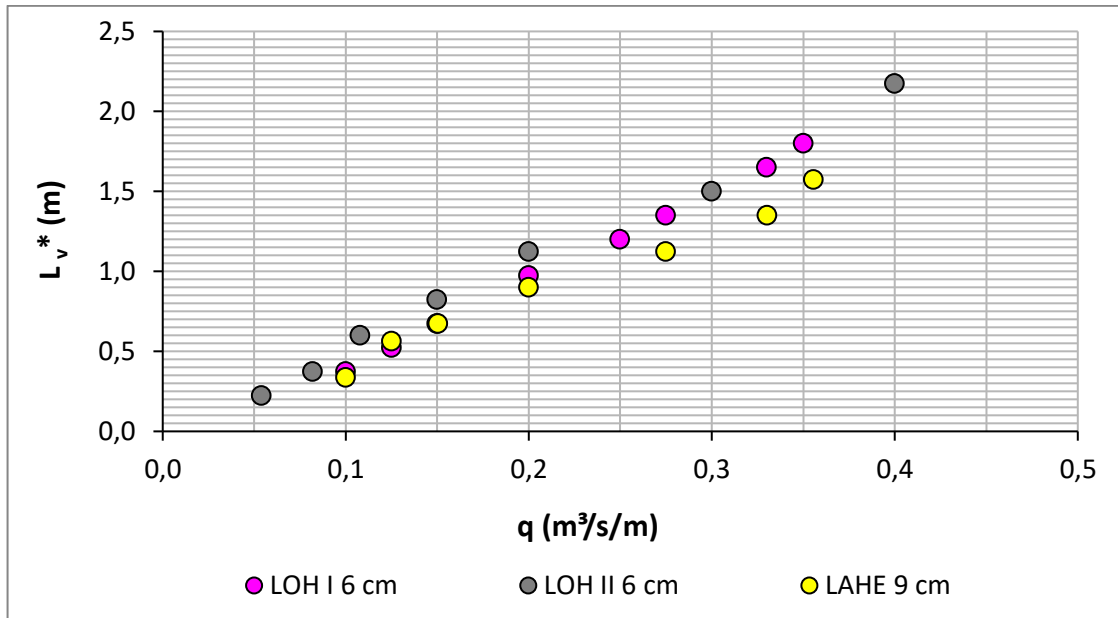


Figura 44 - Posição do início de aeração a partir do início dos degraus (L_v^*) em função da vazão específica (q) para os modelos LAHE, LOH I e LOH I por determinação visual.

A Figura 45 apresenta a posição do início da aeração a partir do início dos degraus (L_v^*) adimensionalizados em função da rugosidade do degrau (k) e do número de Froude rugoso (F^*). Onde se pode observar que o início da aeração (L_v^*) cresce de forma linear com o aumento do número de Froude rugoso (F^*) e que L_v^* pode ser estimado pela Equação 25 abaixo.

$$\frac{L_v^*}{k} = 2,8037 F^* - 1,1378 \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 25}$$

→ Válida para declividade 1,00V:0,75H e EDT $\Rightarrow F^* \geq 1,71$

Como os modelos têm declividade de 1,00V:0,75H, para números de Froude rugosos menores que 1,7 o escoamento não é deslizando sobre turbilhões (EDT), não sendo válida a equação 31.

A determinação do número de Froude rugoso limite foi feita através da equação sugerida por MATOS (1999).

$$\frac{h_c}{h_d} = 0,775 + 0,759 * \exp\left(-2,623 * \frac{h_d}{l_d}\right) \quad \rightarrow h_c \rightarrow q \rightarrow F^* \quad \text{Equação 26}$$

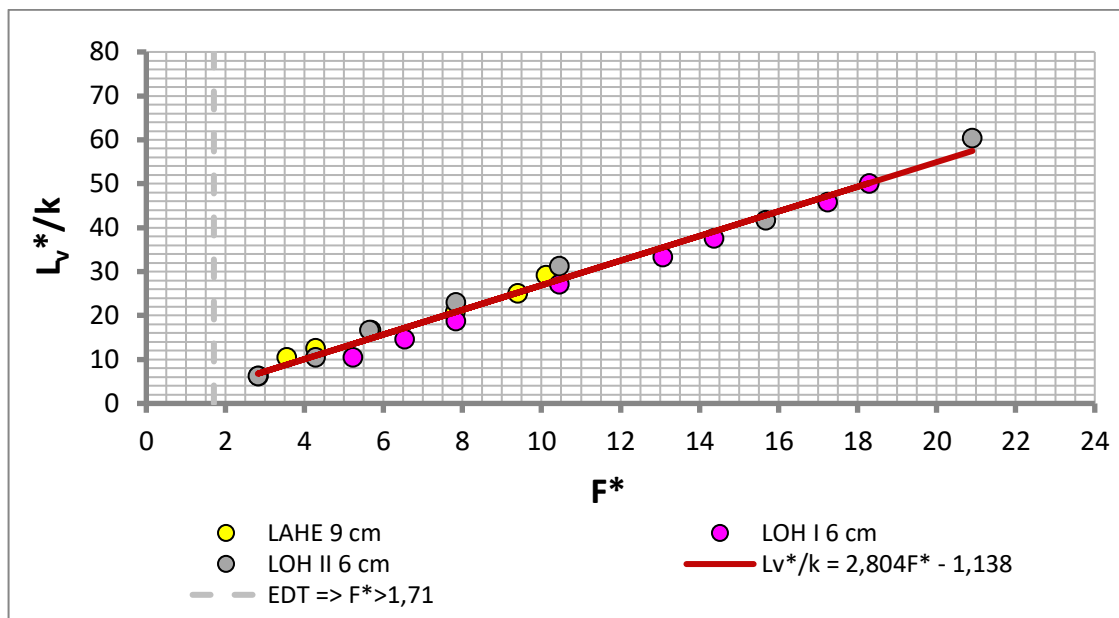


Figura 45 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus (L_v^*) adimensionalizada em função da rugosidade (k) e do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos, LOH I, LOH II e LAHE

A Figura 46 apresenta a posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus (L_v^*) adimensionalizada em função da rugosidade (k) e do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos, LOH I, LOH II e LAHE e de diferentes autores.

Considerando-se apenas os dados dos demais autores, define-se a equação:

$$\frac{L_v^*}{k} = 2,812 F^* - 1,1751 \quad R^2 = 0,98 \quad \text{Equação 27}$$

Válida para declividade 1,00V: 0,75 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,7$

Válida para declividade 1,00V: 0,80 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,65$

Válida para declividade 1,00V: 1,00 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,50$

Comparando-se a relação entre a posição adimensionalizada (L_v^*/k) onde ocorre o início da aeração visual nos modelos LOH I, LOHII e LAHE com a equação feita com os dados de outros autores $(L_v^*/k)_{\text{outros}}$, se observa na Figura 47 que com o aumento do número de Froude rugoso (F^*) há uma redução assintótica desta relação ($L_v^*/L_{v\text{outros}}^*$) de $\approx 1,005$ até o valor de $\approx 0,997$. Ou seja, o início da aeração definido a

partir dos valores obtidos dos modelos LOH I, LOH II e LAHE são praticamente iguais aos definidos pelos demais trabalhos.

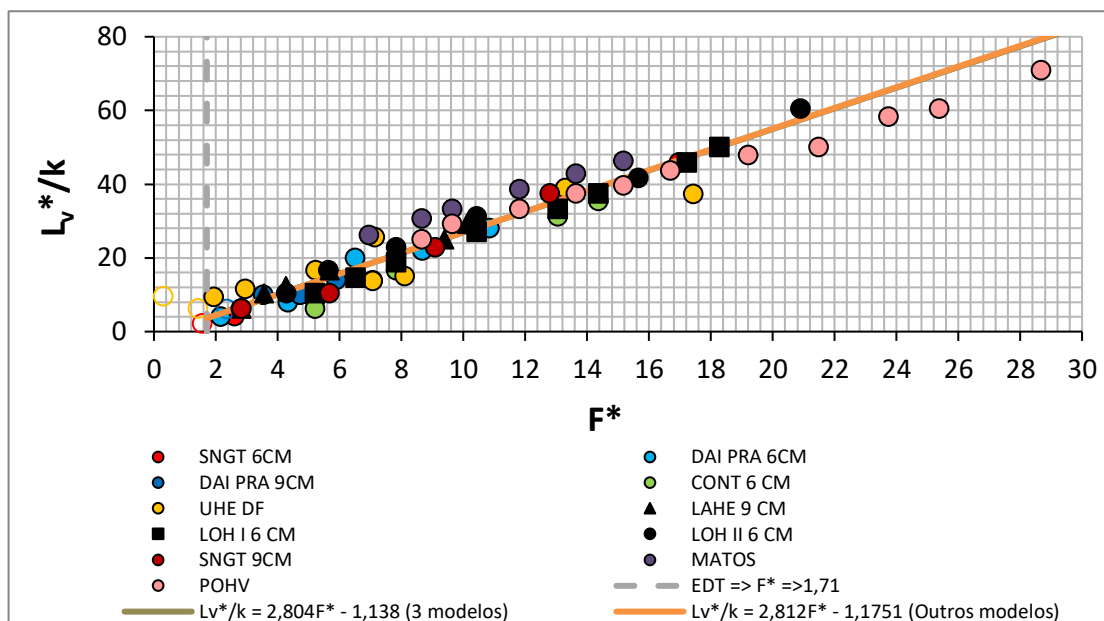


Figura 46 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus (L_v^*) adimensionalizada em função da rugosidade (k) e do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos, LOH I, LOH II e LAHE e de outros autores.

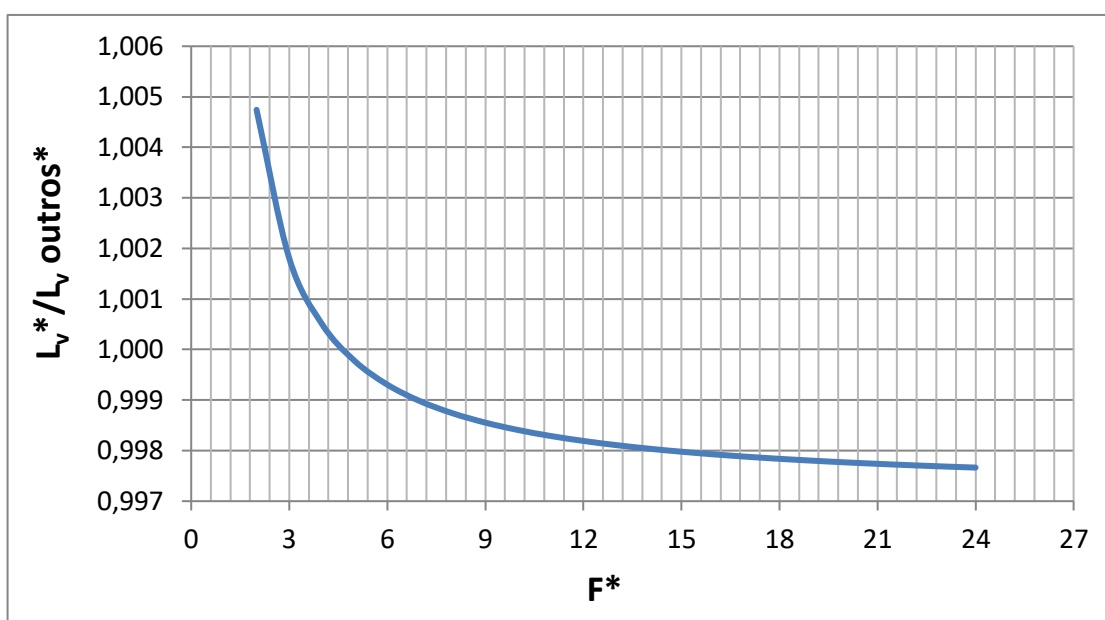


Figura 47: Relação da razão do início da aeração com determinação visual deste trabalho e de demais autores ($L_v^*/L_{v \text{ outros}^*}$) em função do número de Froude rugoso.

5.2 Análise dos dados de pressões extremas junto às quinas dos degraus nos modelos LOH I, LOH II e LAHE

5.2.1 Identificação onde as pressões extremas são mais críticas.

Analisando o comportamento das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%/\gamma}$) e máximas ($P_{99,9\%/\gamma}$) nas proximidades das quinas dos degraus, no espelho e no patamar, foi possível identificar através das medições de pressões feitas nos três modelos, que:

Com relação às Pressões Extremas máximas ($P_{99,9\%/\gamma}$), conforme mostrado nas Figura 48, Figura 49 e Figura 50:

- Tanto as pressões no espelho como no patamar são positivas;
- As maiores pressões ocorrem no patamar;
- As pressões no patamar crescem até ficarem oscilando em torno de um valor;
- As pressões no espelho tendem a oscilar em torno de um valor positivo que varia entre 15% e 20% das pressões máximas do patamar.

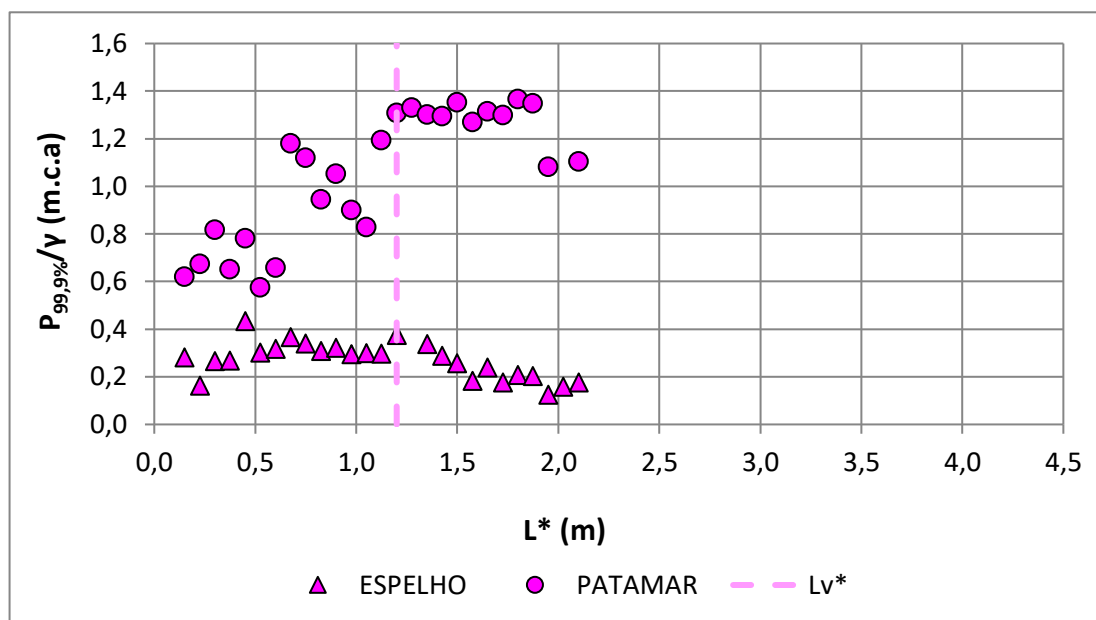


Figura 48 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas ($P_{99,9\%/\gamma}$) nos espelhos e patamares no modelo LOH I para $F^* = 13,06$ e $q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em relação ao início dos degraus (L^*).

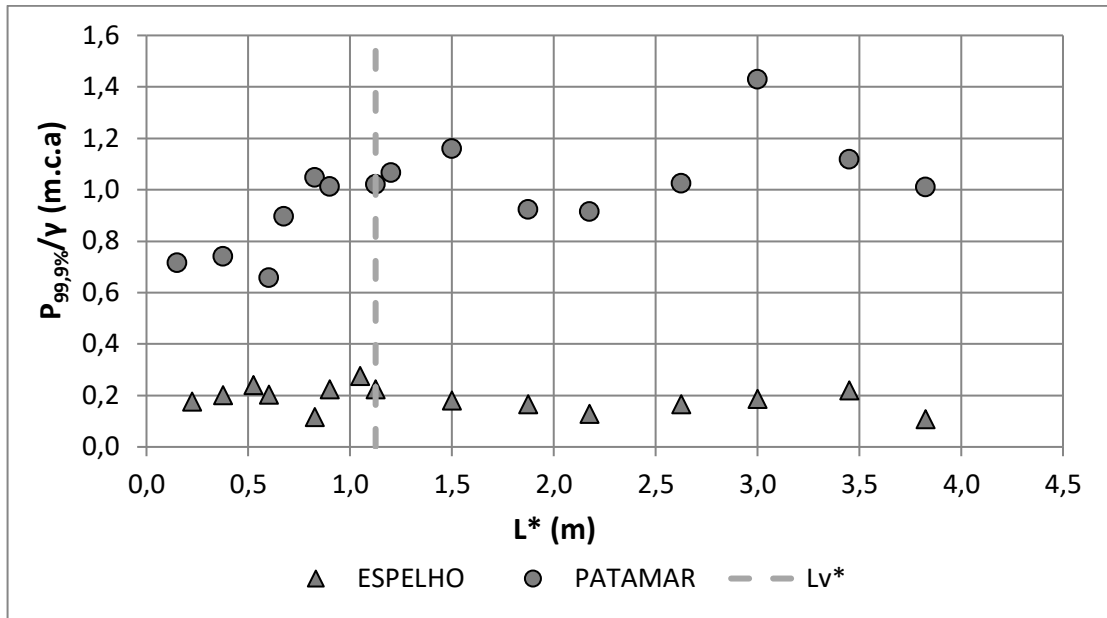


Figura 49 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas ($P_{99,9\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LOH II para $F^* = 13,06$ e $q = 0,25 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em relação ao início dos degraus (L^*).

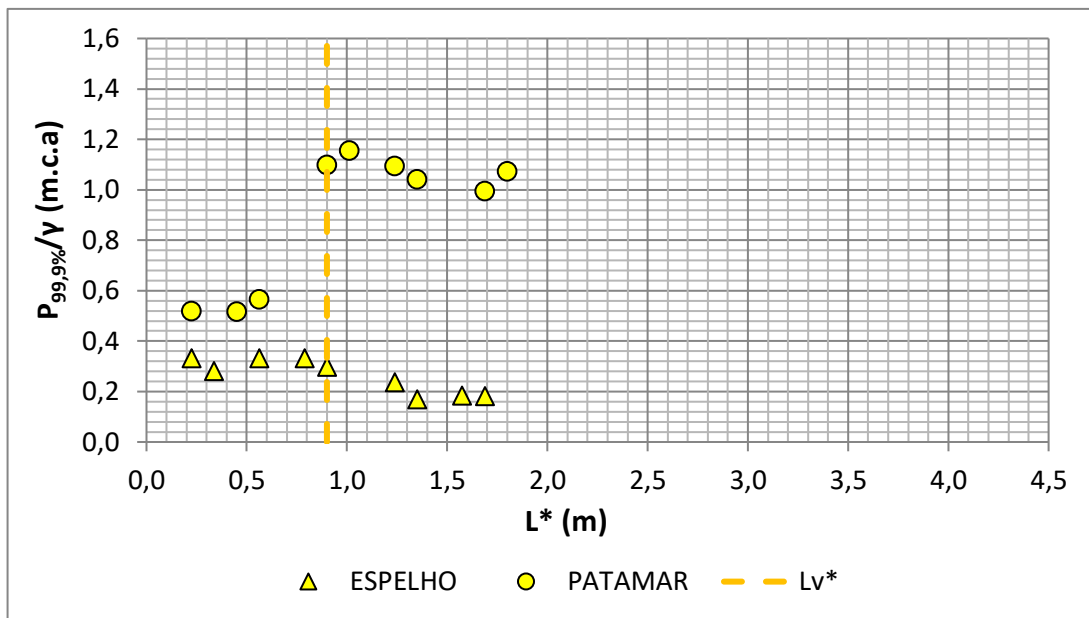


Figura 50 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas ($P_{99,9\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LAHE para $F^* = 5,67$ e $q = 0,20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ em relação ao início dos degraus (L^*).

Com relação às Pressões Extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) conforme pode ser observado nas Figura 51, Figura 52 e Figura 53:

- Tanto as pressões no espelho como no patamar são negativas.
- As menores pressões ocorrem no espelho.

- As pressões no patamar decrescem até ficarem oscilando em torno de um valor.
- As pressões no espelho decrescem até um valor mínimo para voltar a subir até ficarem oscilando em torno de um valor.
- Após encontrarem um valor constante, as pressões do patamar são da mesma ordem de grandeza que as do espelho.

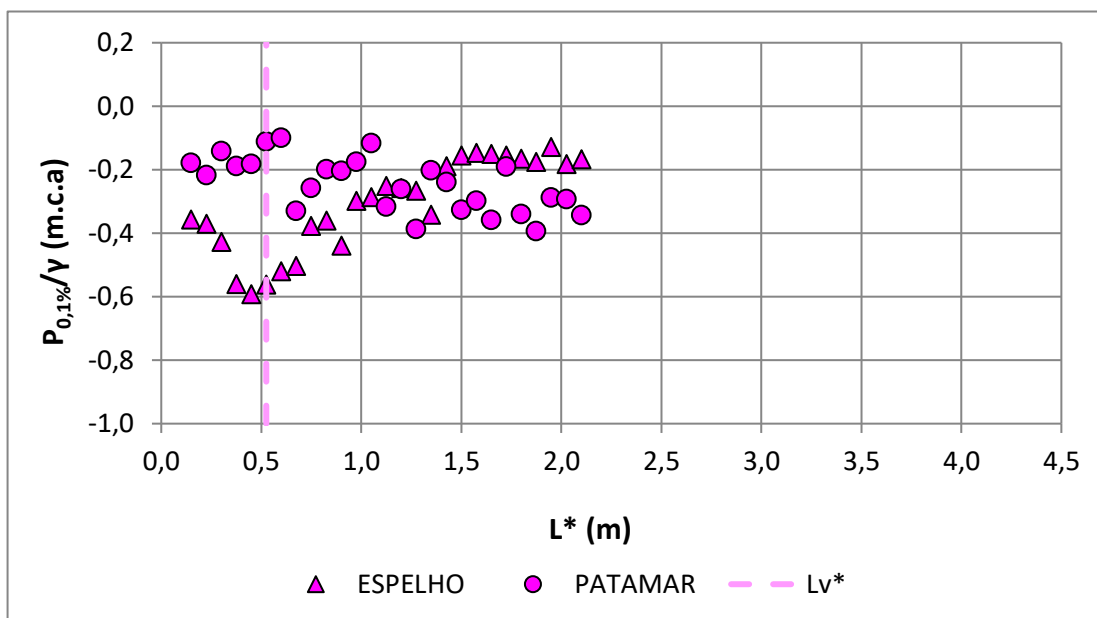


Figura 51 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LOH I para $F^* = 6,53$ e $q = 0,12 \text{ m}^3/\text{s/m}$

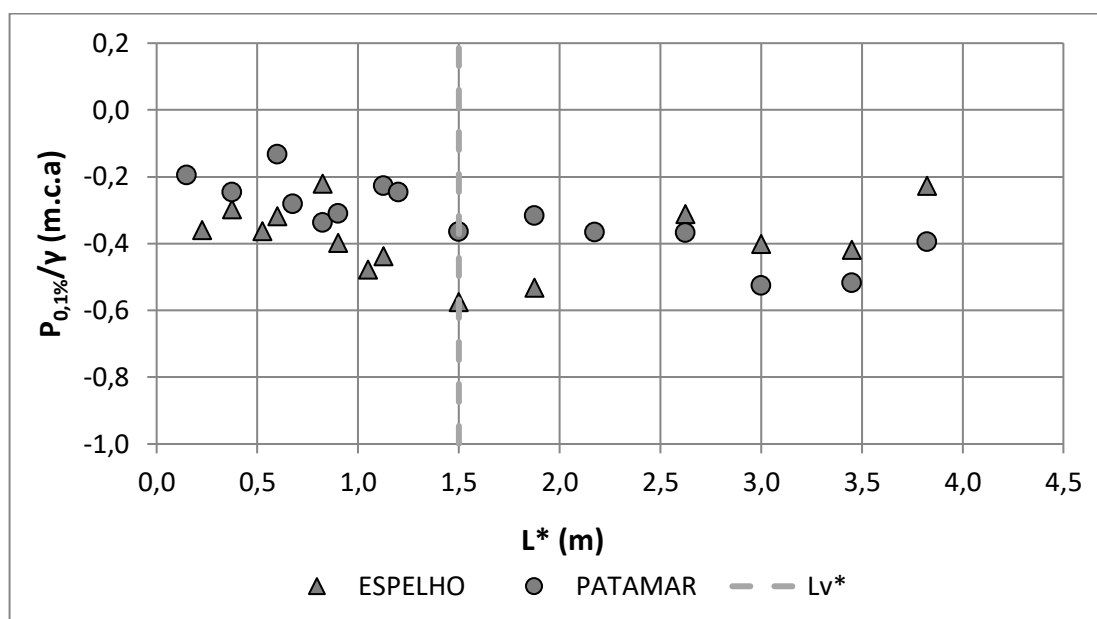


Figura 52 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares modelo LOH II para $F^* = 15,67$ e $q = 0,30 \text{ m}^3/\text{s/m}$.

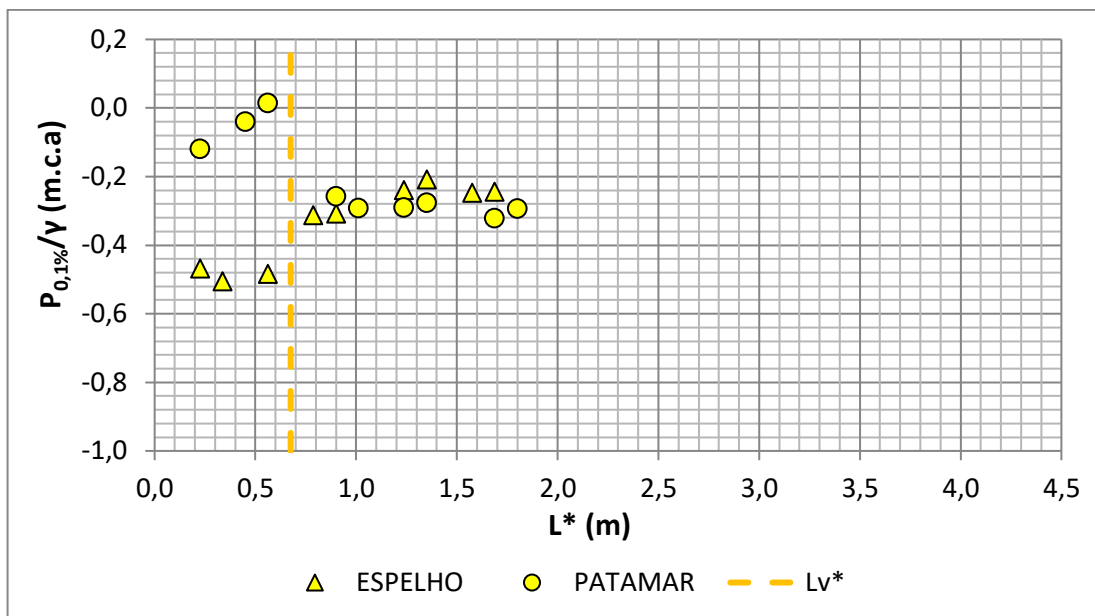


Figura 53 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{0,1\%}/\gamma$) nos espelhos e patamares no modelo LAHE para $F^* = 4,27$ e $q = 0,15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Do exposto acima é possível concluir que:

- Tanto no espelho como no patamar ocorrem pressões extremas negativas ($P_{0,1\%}/\gamma$) sendo mais críticas nos espelhos para o trecho antes da aeração visual.
- Tanto no espelho como no patamar ocorrem pressões extremas positivas ($P_{99,9\%}/\gamma$). No espelho as pressões extremas positivas, são de valor 15% a 20% da pressão extrema máxima no patamar.

Em função do observado acima, a análise do presente trabalho se limitará a pressões mínimas no espelho ($P_{0,1\%}/\gamma$) e máximas no patamar ($P_{99,9\%}/\gamma$).

5.2.2 Análise das pressões extremas da forma tradicional através do coeficiente de pressão (C_p) e adimensional de localização (s')

A análise das pressões extremas ao longo da calha em degraus passou, inicialmente, por uma avaliação comparativa entre as pressões atuantes nos espelhos e nos patamares dos degraus. Desta forma, foi possível observar que as ocorrências de pressões extremas mínimas nos espelhos são mais críticas (inferiores) do que as que ocorrem nos patamares, como já esperado dado o descolamento do escoamento nas quinas dos degraus. Com relação às pressões extremas máximas, verificou-se

que estas são mais críticas nos patamares, o que também era esperado pois estes sofrem a ação direta do escoamento. Em função do exposto, procurou-se adimensionalizar os valores obtidos nos diferentes modelos (LOH I, LOH II e LAHE) deste trabalho e compará-los com os obtidos por outros autores, de maneira a buscar uma possível generalização dos resultados.

Nesta etapa da análise os dados de pressões extremas foram adimensionalizados pela energia cinética do escoamento através do Coeficiente de Pressão (C_P) e do parâmetro adimensional de posição (s'), conforme sugerido por AMADOR (2005) e GOMES (2006):

$$C_{P_{x\%}} = \frac{\frac{P_{x\%}}{\gamma}}{\frac{v^2}{2g}} \quad \text{Equação 28}$$

$$s' = \frac{L - L_a}{h_a} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

$C_{P_{x\%}}$ = coeficiente de pressão com x% de probabilidade de não excedência

$P_{x\%}/\gamma$ = Pressão com x% de probabilidade de não excedência

X% = índice da pressão que pode ser:

* 99,9 % de ser inferior a um valor ($P_{99,9\%}/\gamma$)

* 0,1 % de ser inferior a um valor ($P_{0,1\%}/\gamma$)

v = velocidade média do escoamento no início da aeração = q/h_a

q = vazão específica

L = distância ao ponto de medição a partir da crista do vertedouro

L_a = distância da crista do vertedouro até o início da aeração

h_a = altura de água no início da aeração.

$\frac{h_a}{k} = 0,354 \cdot F^{*0,591}$ - Fórmula de MEIRELES (2004)

k = rugosidade da calha

F^* = número de Froude rugoso

s' = posição adimensional com valor zero (0) no ponto de início da aeração

a) Análise das pressões extremas mínimas nos espelhos

A Figura 54 apresenta os resultados adimensionalizados para a distribuição longitudinal das pressões ao longo da calha nas quinas dos espelhos em função do coeficiente de pressões extremas ($C_{Pe0,1\%}$), e da posição relativa ao longo da calha (s') para os modelos LOH I, LOH II e LAHE. Pela análise da figura observa-se que:

- Os valores apresentaram uma dispersão significativa entre as vazões dos modelos e entre modelos;
- O menor valor do coeficiente de pressão das extremas mínimas ($C_{Pe0,1\%min}$) oscilou entre $\approx -1,25$ e $\approx -0,52$ no entorno da posição $s' = 0$; o valor mínimo de $C_{Pe0,1\%}$ para cada modelo foi:
 - * LOH I $\Rightarrow C_{Pe0,1\%min} \approx -1,24$;
 - * LOH II $\Rightarrow C_{Pe0,1\%min} \approx -0,60$;
 - * LAHE $\Rightarrow C_{Pe0,1\%min} \approx -1,02$;

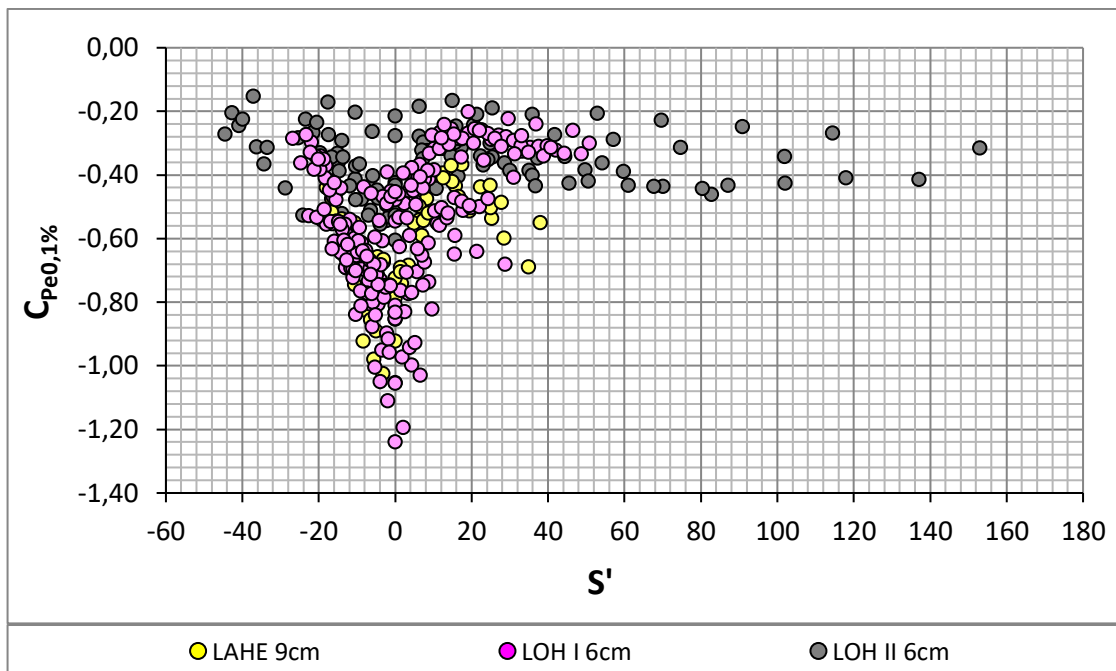


Figura 54 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pe0,1\%}$) e à posição relativa (s') para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.

- Após a posição $s' \geq 20$ os valores do $C_{P0,1\%}$ tendem a oscilar em torno de um valor, mas com uma grande dispersão;

* LOH I $\Rightarrow C_{Pe0,1\%} \approx -0,30$ (valor Médio);

* LOH II $\Rightarrow C_{Pe0,1\%} \approx -0,30$ (valor Médio);

*LAHE $\Rightarrow C_{Pe0,1\%} \approx -0,5$ (valor Médio);

Quando se compara estes resultados com os de outros autores (Figura 55) se observa que:

- Os dados apresentam a mesma ordem de dispersão.
- Os dados dos demais autores ficaram dentro da variação dos dados dos modelos LOH I, LOH II e LAHE. Com exceção dos dados de DAI PRÁ (2005), que apresentam declividade da calha de 1,00(V):1,00(H) e valores de $C_{Pe0,1\%}$ maiores.
- O modelo LOH I apresenta a maior amplitude entre os valores de $C_{Pe0,1\%}$.
- Após a posição $s' \geq 20$ os valores do $C_{Pe0,1\%}$ variaram entre -0,6 e -0,2.

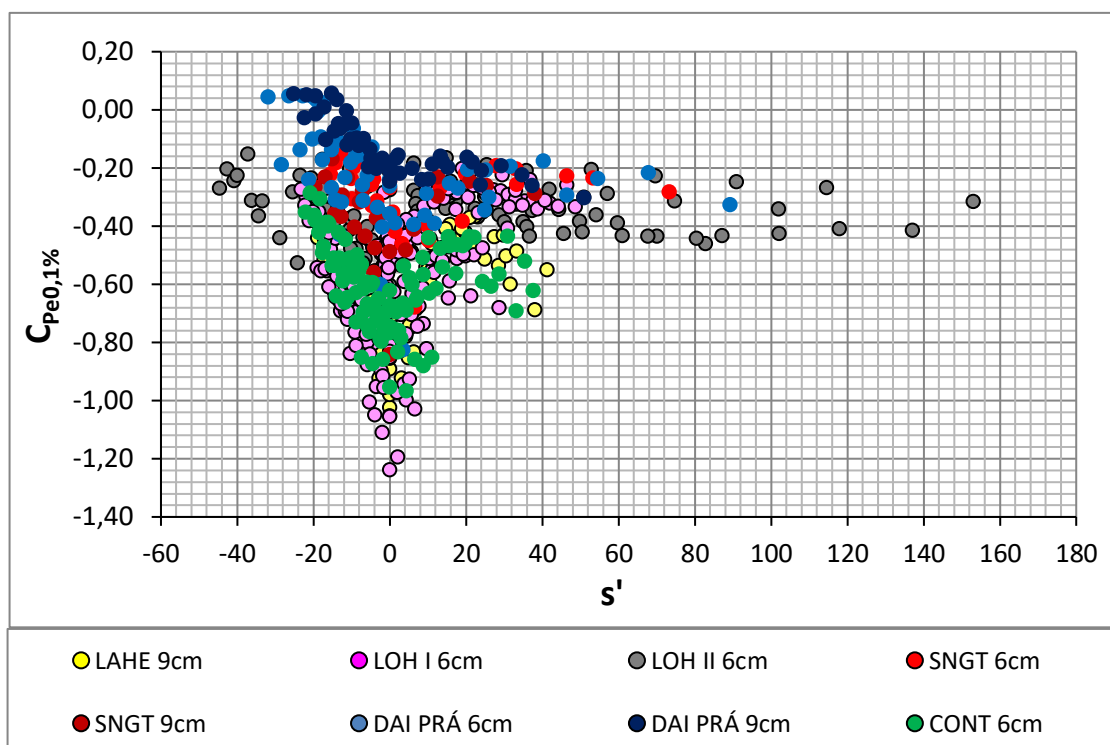


Figura 55 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pe0,1\%}$) e à posição relativa (s'). Para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores

Analisando-se a Figura 56 que apresenta os valores de $C_{pe0,1\%}$ próximos às quinas dos espelhos no ponto de início de aeração ($s' = 0$) em função do número de Froude rugoso se observa que:

- Os três modelos apresentam comportamentos distintos, mas com tendência semelhantes, ou seja, aumento do valor de $C_{pe0,1\%}$ com o número de Froude rugoso (F^*).
- Há uma tendência de os valores dos três modelos convergirem para $C_{pe0,1\%} \approx -0,20$ para $F^* \geq 20$

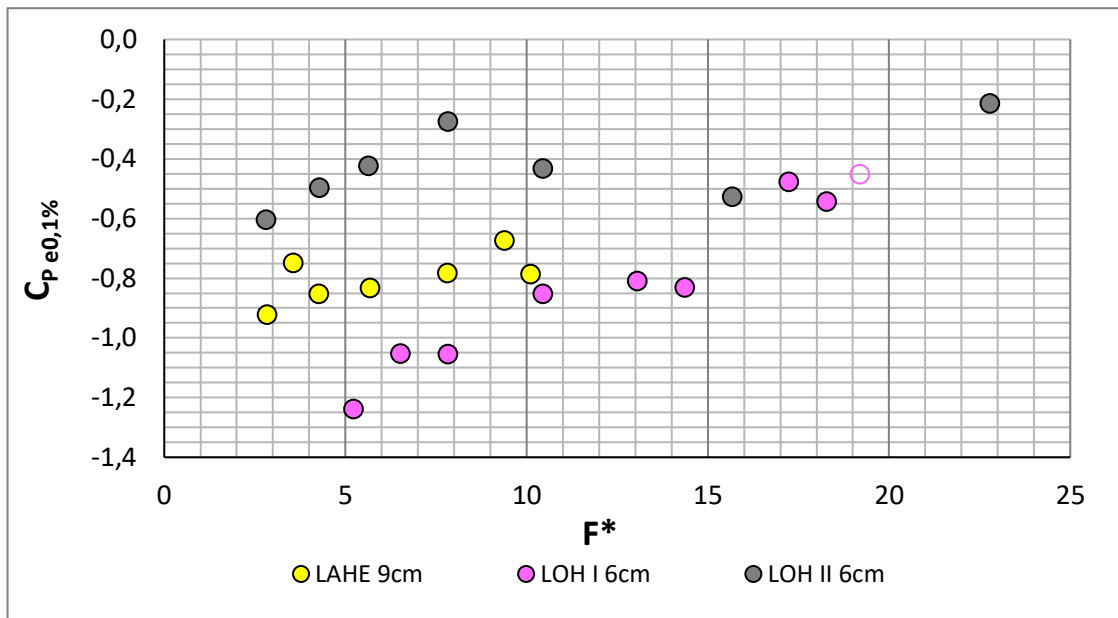


Figura 56 - Valores de $C_{pe0,1\%}$ para o espelho em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos do LOH ,I LOH II e LAHE na posição $s' = 0$. Para o ponto vazado, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima.

Quando se compara com outros autores (Figura 57) observa-se que:

- Os modelos apresentam comportamentos distintos, mas com tendências semelhantes, ou seja, aumento do valor de $C_{pe0,1\%}$ com o número de Froude rugoso (F^*).
- Há uma tendência de os valores dos modelos convergirem para $C_{pe0,1\%} \approx -0,2$.

Não é, possível, através do adimensional $C_{pe0,1\%}$, se estimar as condições de pressões em função do escoamento uma vez que não se verifica uma tendência entre os dados dos modelos utilizados na análise.

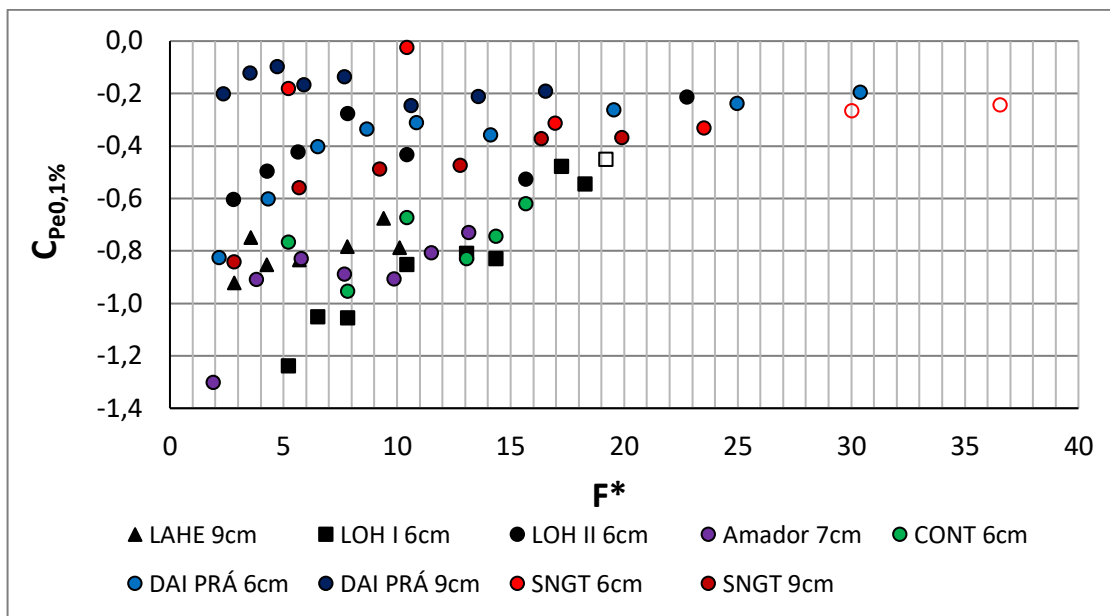


Figura 57 - Valores de mínimos de $C_{pe0,1\%}$ para o espelho em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e os resultados de outros autores. Para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima.

b) Análise das pressões extremas máximas nos patamares.

A Figura 58 apresenta os resultados adimensionalizados para a distribuição longitudinal das pressões ao longo da calha nas quinas dos patamares em função do coeficiente de pressões extremas ($C_{pp99,9\%}$) e da posição relativa ao longo da calha (s') para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.

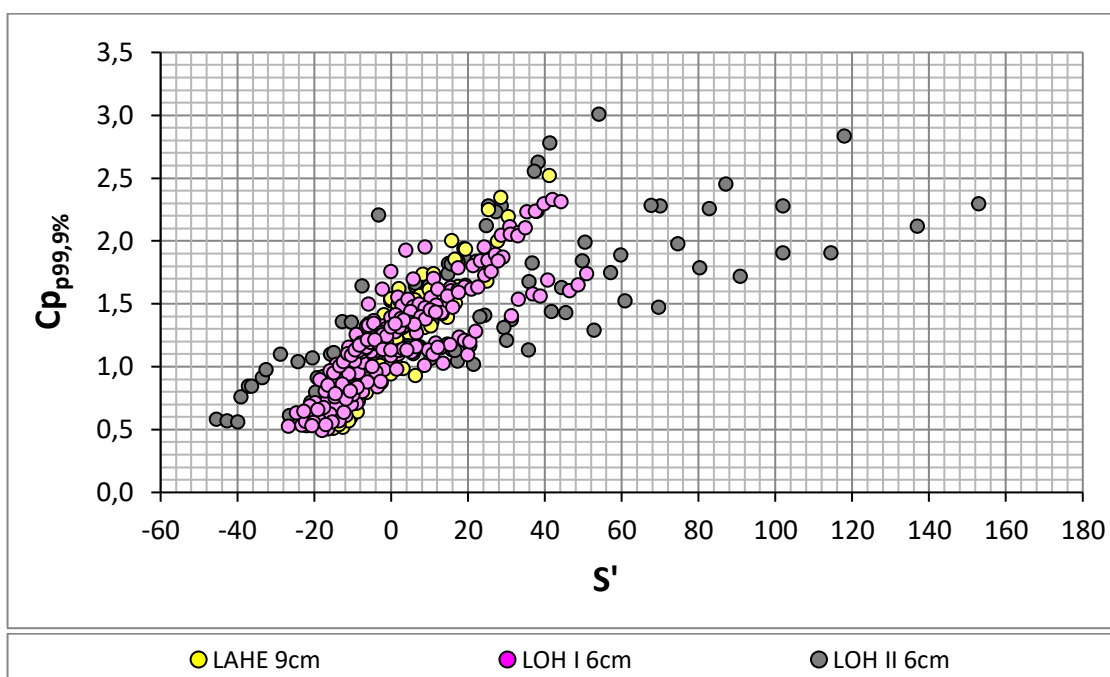


Figura 58 - Pressões extremas com 99,9 % de não excedência junto à quina do patamar do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{pp99,9\%}$) e à posição relativa (s') para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.

Pela análise da figura pode-se observar que:

- Os valores apresentaram uma dispersão significativa entre as vazões dos modelos e entre os modelos.
- O valor do coeficiente de pressão para a pressão extrema máxima ($C_{Pp99,9\%max}$), oscilou entre $\approx 0,78$ e $\approx 1,76$ no entorno da posição $s'=0$. O valor máximo de ($C_{Pp99,9\%max}$), para cada modelo foi:
 - * LOH I $\approx 2,30$;
 - * LOH II $\approx 3,00$;
 - * LAHE $\approx 2,50$;
- Os valores máximos oscilaram de $\approx 2,3$ a $3,00$. Sendo o modelo LOH II o que mais dispersão apresentou.

Quando se compara estes resultados com os de outros autores (Figura 59) se observa que:

- Os dados apresentam mesma ordem de dispersão.
- Os dados dos demais autores ficaram dentro da variação dos modelos LOH I, LOH II e LAHE.

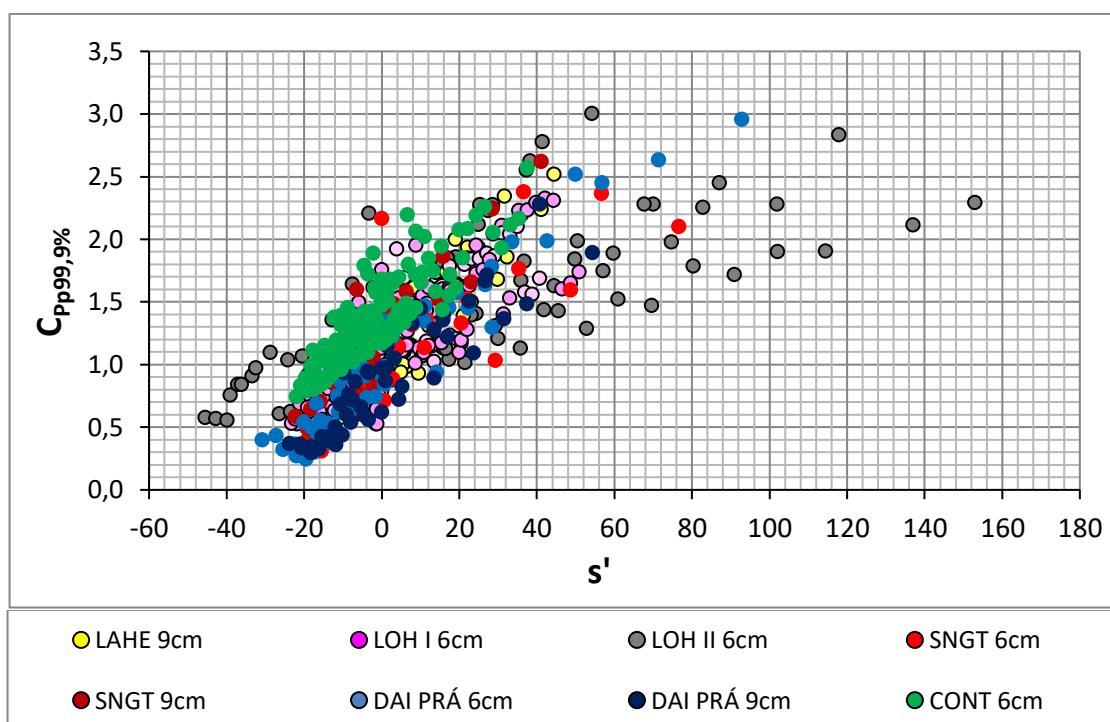


Figura 59 - Pressões extremas máximas com probabilidade de 99,9 % de não excedência junto à quina do patamar do degrau adimensionalizada em relação aos coeficientes de pressão ($C_{Pp99,9\%}$) e à posição relativa (s') para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores.

Da mesma maneira que se tentou identificar uma tendência de comportamento das pressões mínimas no espelho ($C_{Pe0,1\%mim}$) em função do número de Froude rugoso (F^*), procurou-se identificar qual seria a tendência das pressões extremas máximas no patamar ($C_{Pp99,9\%}$) na posição $s' = 0$. A Figura 60 apresenta os resultados encontrados para os três modelos onde se observa que há uma tendência do $C_{Pp99,9\%}$ oscilar em torno de um valor, independente do número de Froude rugoso (F^*).

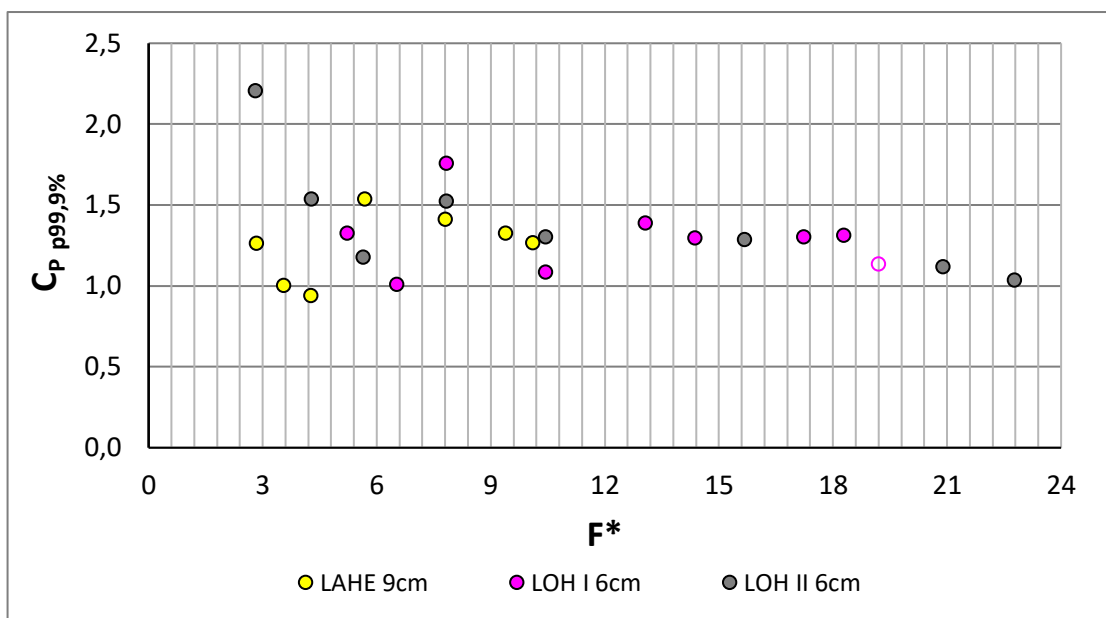


Figura 60 - Valores de $C_{p_{99,9\%}}$ na posição $s' = 0$ para o patamar em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos LOH I, LOH II e LAHE. Para o ponto vazado, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima.

Quando se compara estes valores com os de outros autores (Figura 61) observa-se que também há uma tendência de oscilar em torno de um valor para os dados de um mesmo modelo, entretanto não é possível se determinar uma tendência geral devido à grande dispersão.

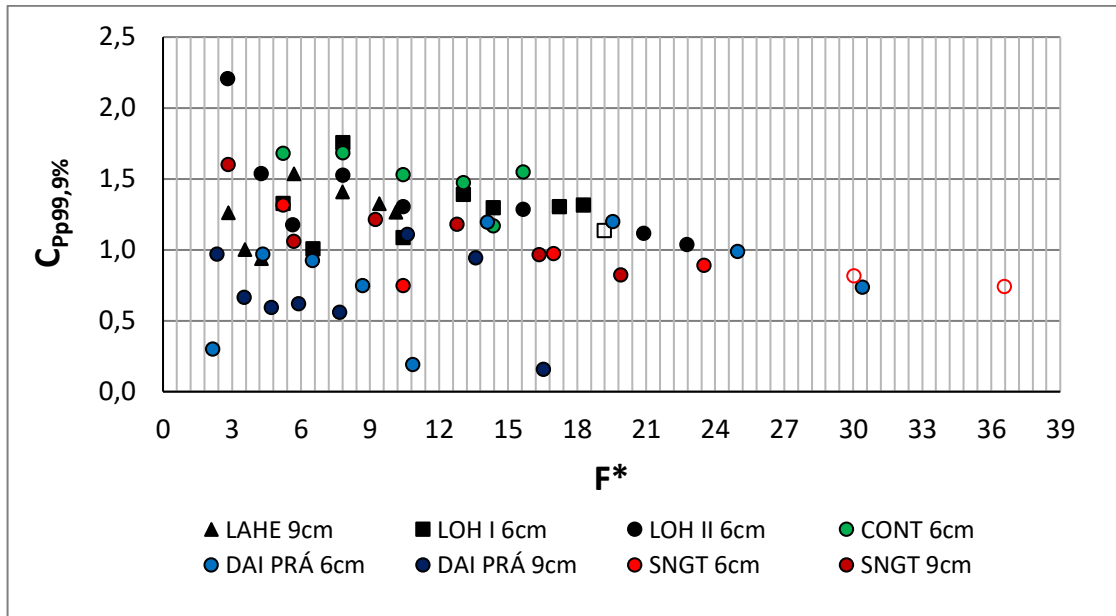


Figura 61 - Valores de $C_{p_{p99,9\%}}$ na posição $s' = 0$ para o patamar em função do número de Froude rugoso (F^*) para os modelos LOH ,I LOH II, LAHE e modelos de outros autores. Para os pontos vazados não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima.

5.2.3 Pressões adimensionalizadas pela altura crítica do escoamento (h_c) nas quinas dos degraus e adimensional de localização (s')

A adimensionalização empregada por MEIRELES (2004) e OSMAR (2016) dos dados de pressão foi através do emprego da altura crítica do escoamento (h_c). Os adimensionais utilizados foram:

$$\zeta_{P_x} = \frac{P_x}{\gamma h_c} \quad \text{Equação 30}$$

$$s' = \frac{L - L_a}{h_a} \quad \text{Equação 31}$$

Onde:

ζ_{P_x} = coeficiente adimensional de pressão x

$\frac{P_x}{\gamma}$ = pressão analisada em m.c.a.

x = índice da pressão que pode ser:

* 99,9 % de ser inferior a um valor ($P_{99,9\%}/\gamma$)

* 0,1 % de ser inferior a um valor ($P_{0,1\%}/\gamma$)

h_c = altura crítica (m)

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

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

L = distância do ponto de medição a partir da crista do vertedouro (m)

L_a = distância da crista do vertedouro até o início da aeração (m)

h_a = altura de água no início da aeração (m)

$$\frac{h_a}{k} = 0,354 \cdot F^{*0,591}$$

k = rugosidade do degrau (m)

F^* = número de Froude rugoso

Para Pressões extremas mínimas nos espelhos a

- a) Figura 62 apresenta os resultados da distribuição longitudinal de pressão ao longo da calha adimensionalizada em função da altura crítica do escoamento para diferentes posições relativas ao longo da calha (s') para os modelos do LOH I, LOH II e LAHE.

Pela análise da figura 63 se pode observar que:

- Os valores de $\zeta_{e_{0,01\%}}$ apresentaram uma dispersão significativa entre as vazões de cada modelos e entre os modelos.
- O menor valor dos coeficientes das pressões extremas mínimas $\zeta_{e_{0,01\%min}}$ oscilou entre $-5,1$ e $-3,2$;
 - * LOH I $\Rightarrow \zeta_{e_{0,01\%}} \approx -5,1$;
 - * LOH II $\Rightarrow \zeta_{e_{0,01\%}} \approx -3,2$.
 - * LAHE $\Rightarrow \zeta_{e_{0,01\%}} \approx -4,1$;
- O modelo LOH I apresenta uma maior amplitude entre os valores de $\zeta_{e_{0,01\%}}$.
- Após a posição $S' \geq 20$ os valores do $\zeta_{e_{0,01\%}}$ tendem a oscilar entre $-0,78$ e $-3,0$.

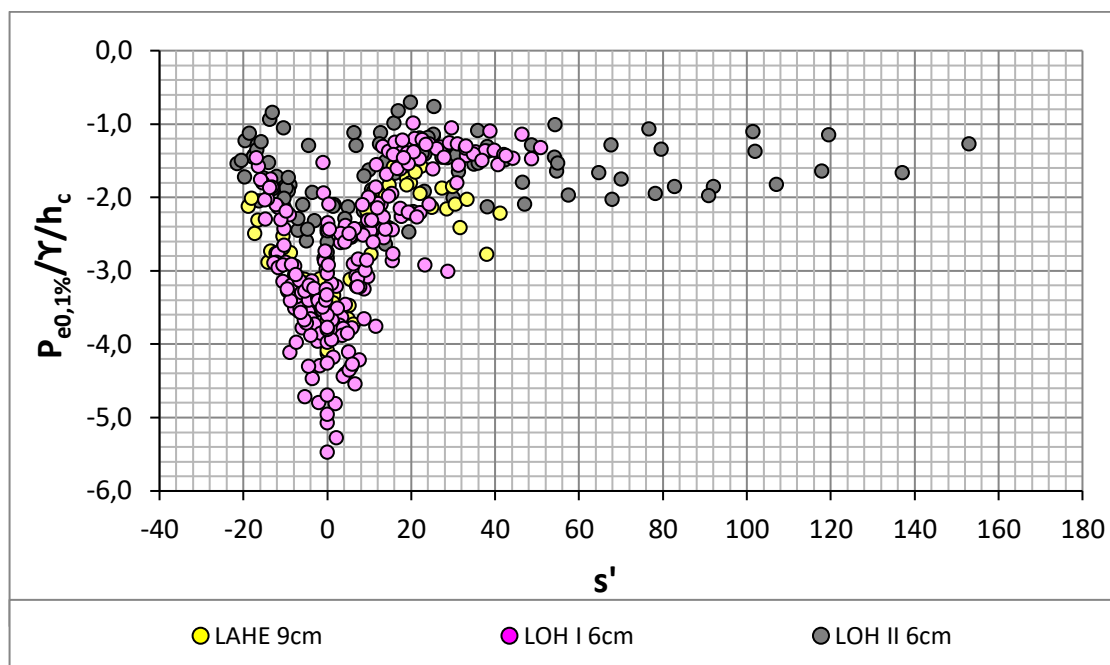


Figura 62 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência, junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação ao emprego da altura crítica do escoamento ($P/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s'). Para os modelos LOH I, LOH II e LAHE

Quando se comparam estes resultados com os obtidos por outros autores (Figura 63) se observa que:

- Os dados apresentam mesma ordem de dispersão.
- O modelo LOH I apresenta a maior amplitude entre os valores de $\zeta_{e0,01\%}$.
- Após a posição $S' \geq 20$ os valores do $\zeta_{e0,01\%}$ tendem a oscilar entre -0,78 e -3,0.
- Analisando-se os valores de $\zeta_{e0,01\%}$ na posição $s' = 0$ em função do número de Froude rugoso (F^*) se observa que não há uma tendência de comportamento dos valores (Figura 64).

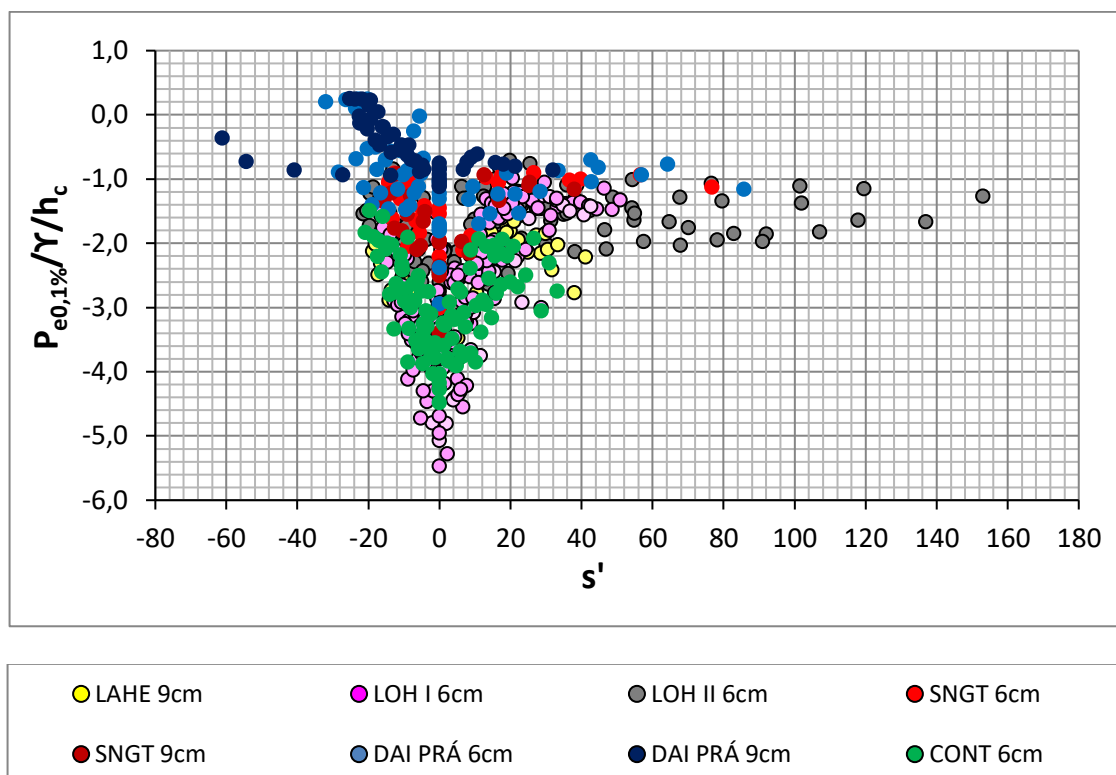


Figura 63 - Pressões extremas com probabilidades de 0,1% de não excedência junto à quina do espelho do degrau adimensionalizada em relação ao emprego da altura crítica do escoamento ($P/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s') Para os modelos LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores.

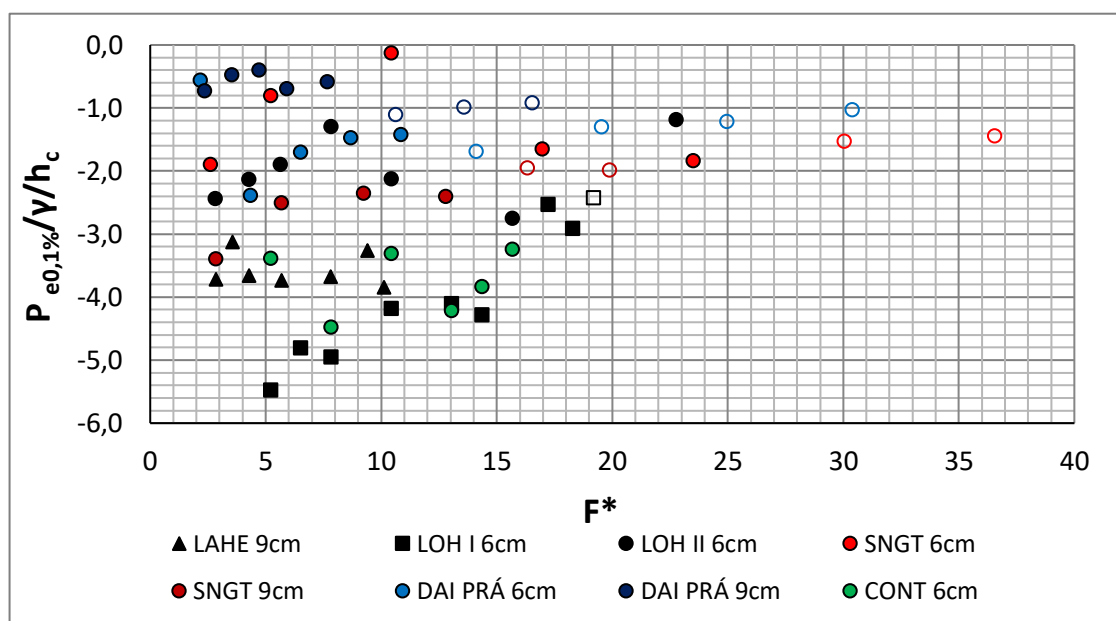


Figura 64 - Valores de $\zeta_{e0,1\%}$ na posição $s' = 0$ para o espelho em função do Número de Froude rugoso (F^*) para os modelos do LOH ,I LOH II e LAHE e de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima.

b) Para pressões extremas máximas nos patamares

A Figura 65 apresenta os resultados adimensionalizados para a distribuição de pressões ao longo da calha junto aos patamares dos degraus, em função do coeficiente de pressões extremas ($\zeta_{p_{99,9\%}}$) e da posição relativa ao longo da calha (s') para os modelos do LOH I, LOH II e LAHE. Pela figura pode-se observar que:

- Os valores apresentaram uma dispersão significativa entre as vazões dos modelos e entre os modelos.
- O valor do coeficiente de pressão das extremas máximas ($\zeta_{p_{99,9\%max}}$), oscilou entre 2,20 e 12,04.
- Após a posição $s' \geq 20$ os valores do coeficiente $\zeta_{p_{99,9\%max}}$, tendem a oscilar entre 4,5 e 8,10.

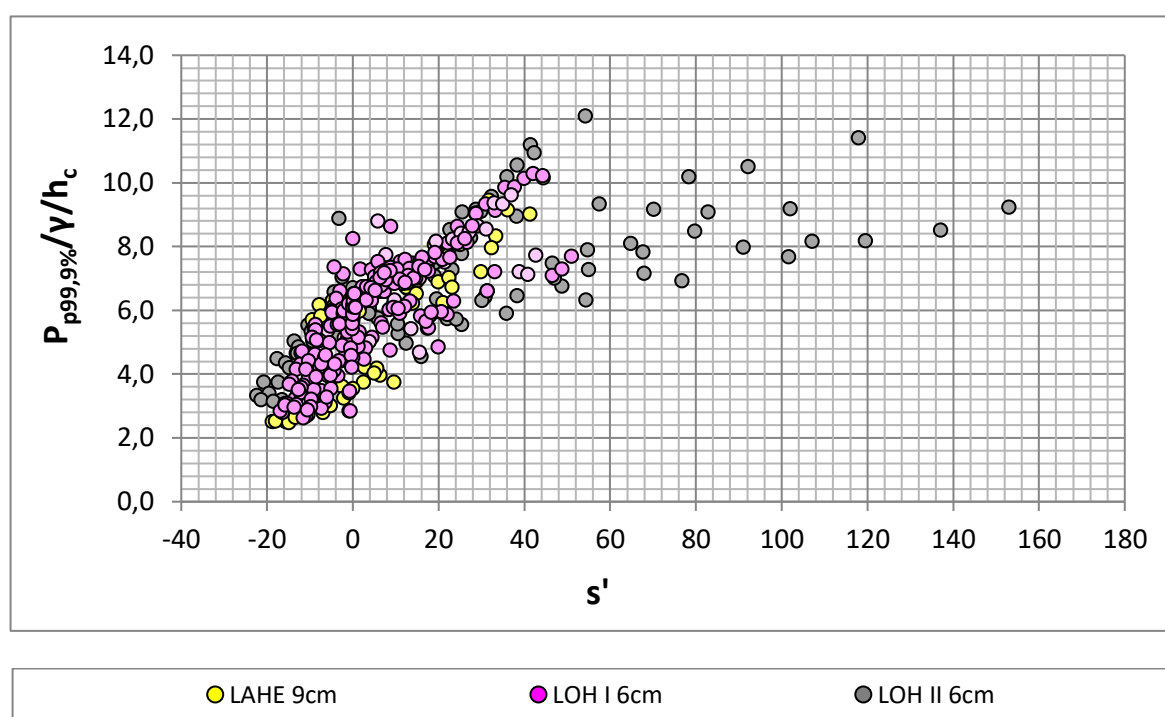


Figura 65 - Pressões extremas de 99,9 % de não excedência junto à quina do patamar do degrau adimensionalizada em relação a altura crítica do escoamento ($P_{p_{99,9\%}}/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s') Para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.

Quando se compara estes resultados com os de outros autores (Figura 66) se observa que:

- Os dados apresentam mesma ordem de dispersão.
- Os dados dos demais autores ficaram em geral dentro da variação dos modelos do LOH I, LOH II e LAHE.

- Após a posição $s' \geq 20$ os valores do $(\zeta_{p_{99,9\%max}})$, tendem a oscilar entre 4,83 e 12,04.

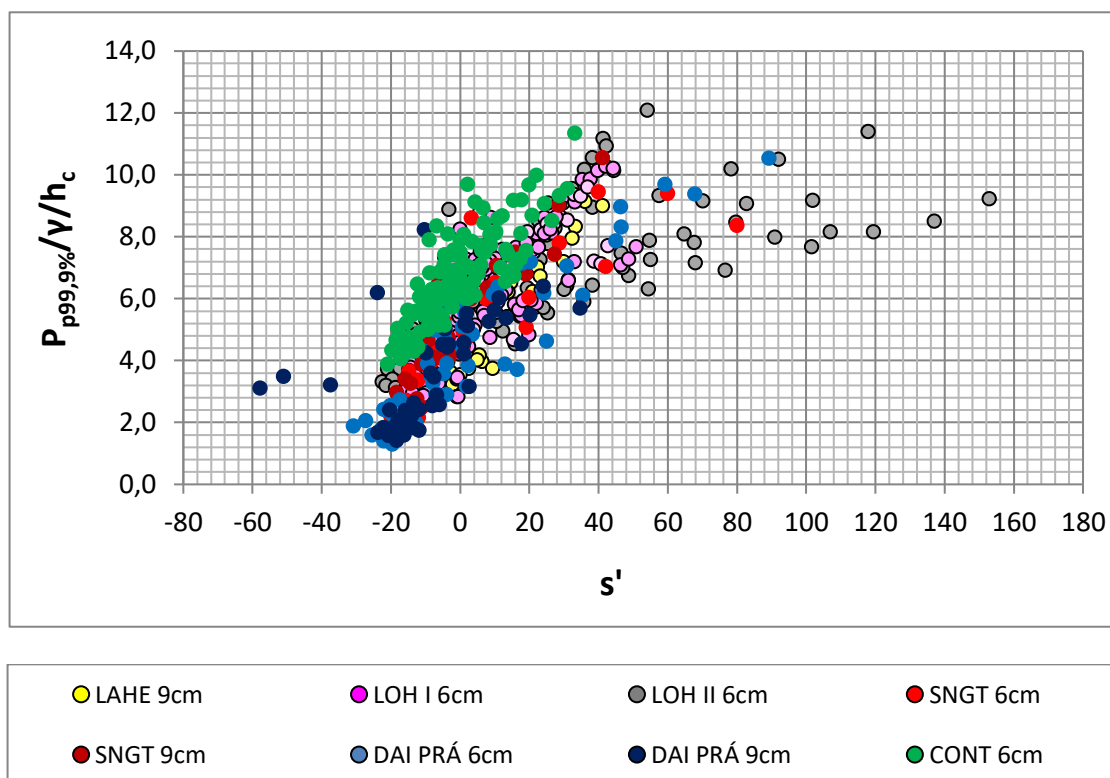


Figura 66 - Pressões extremas adimensionalizada em relação à altura crítica do escoamento ($P_{p_{99,9\%}}/\gamma/h_c$) e à posição relativa (s') junto à quina do patamar do degrau com probabilidades de 99,9 % de não excedência para os modelos do LOH I, LOH II, LAHE e de outros autores

Analisando-se os valores de $\zeta_{p_{99,9\%}}$ na posição $s' = 0$ em função do número de Froude rugoso (F^*) se observa que não há uma tendência dos valores nem em um mesmo modelo (Figura 67).

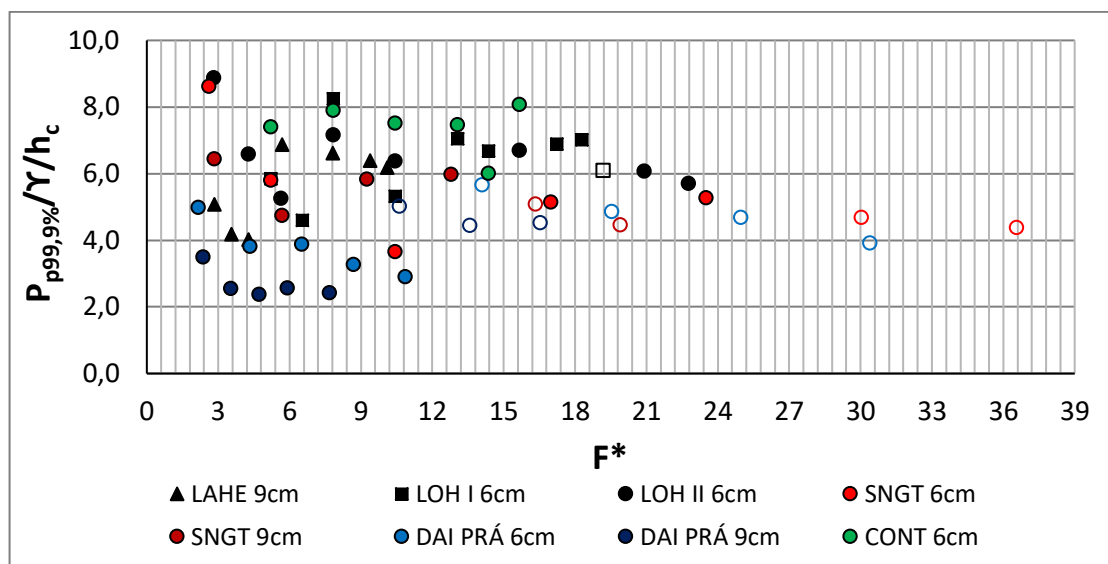


Figura 67 - Valores de $\zeta_{p_{99,9\%}}$ na posição $s'=0$ para o patamar em função do Número de Froude Rugoso (F^*) para os modelos do LOH ,I LOH II e LAHE e modelos de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem a certeza se o escoamento atingiu a pressão extrema mínima.

Observa-se que a análise tradicional das adimensionalizações das pressões extremas apresenta uma dispersão muito grande nos dados, o que dificulta a interpretação e a estimativa de valores a serem previstos. Entretanto, todos os dados mostraram tendência semelhante entre os modelos:

No espelho:

- As pressões mínimas tentem a decrescer até um valor mínimo para depois aumentarem até um valor praticamente constante;

No patamar:

- As pressões máximas aumentam até um valor e depois permanecem praticamente constantes;

5.2.4 Proposta de uma nova abordagem para análise das pressões extremas

Este trabalho propõe que a abordagem se concentre nos seguintes pontos notáveis da distribuição longitudinal das pressões mínimas e da distribuição longitudinal das pressões máximas, por serem valores importantes no dimensionamento de vertedouros em degraus:

- Ponto de início da aeração.
- Pressão extrema mínima no espelho, seu valor é determinante na avaliação do risco potencial de cavitação.

- Pressão extrema máxima no patamar para o dimensionamento estrutural das quinas dos degraus.
- Locais onde acontecem as pressões extremas mínimas e máximas para a determinação dos trechos sujeitos a esforços extremos.
- Local onde as pressões mínimas e máximas se estabilizam para a determinação do fim dos trechos com maior risco de dano na superfície sólida.

a) Análise do comportamento da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%/\gamma}$)

As Figura 68, Figura 69 e

Figura 70 apresentam a distribuição longitudinal dos valores das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) no espelho, onde se pode observar que:

- Para um mesmo modelo e uma mesma vazão específica (q) ou o mesmo número de Froude rugoso (F^*):
 - * A medida que o comprimento da calha (L^*) aumenta para jusante, os valores das pressões mínimas extremas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) diminuem até uma posição ($L_{e0,1\%min}$) onde alcançam o seu valor mínimo ($P_{e0,1\%min/\gamma}$).
- Após a posição ($L_{e0,1\%min}$), onde a pressão extrema mínima alcança o seu menor valor ($P_{e0,1\%/\gamma} = P_{e0,1\%min/\gamma}$), com o aumento do comprimento da calha (L^*) a mesma aumenta até oscilar em torno de um valor médio ($P_{e0,1\%n/\gamma}$) a partir de uma posição na calha (L^*_n).

A distribuição longitudinal dos valores das pressões mínimas extremas ($P_{e0,1\%/\gamma}$), para uma vazão específica (q) passa pelos valores de pressões mínimas das vazões inferiores a esta (

Figura 71, Figura 72 e Figura 73) até alcançar o valor mínimo da pressão extrema mínima ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) que ocorre na posição $L = L^*_{emin}$.

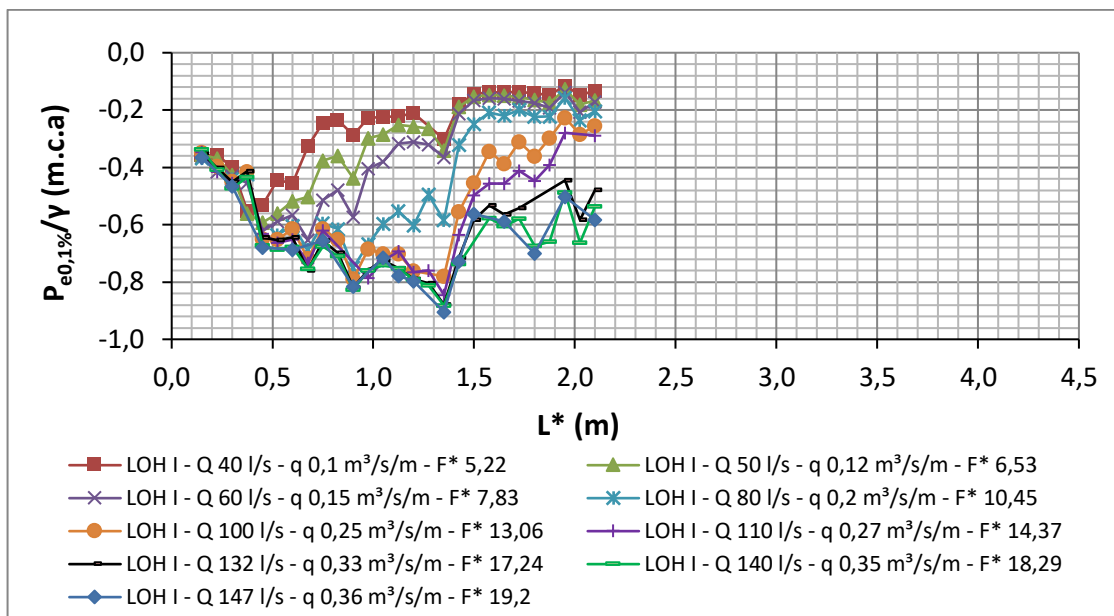


Figura 68 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH I.

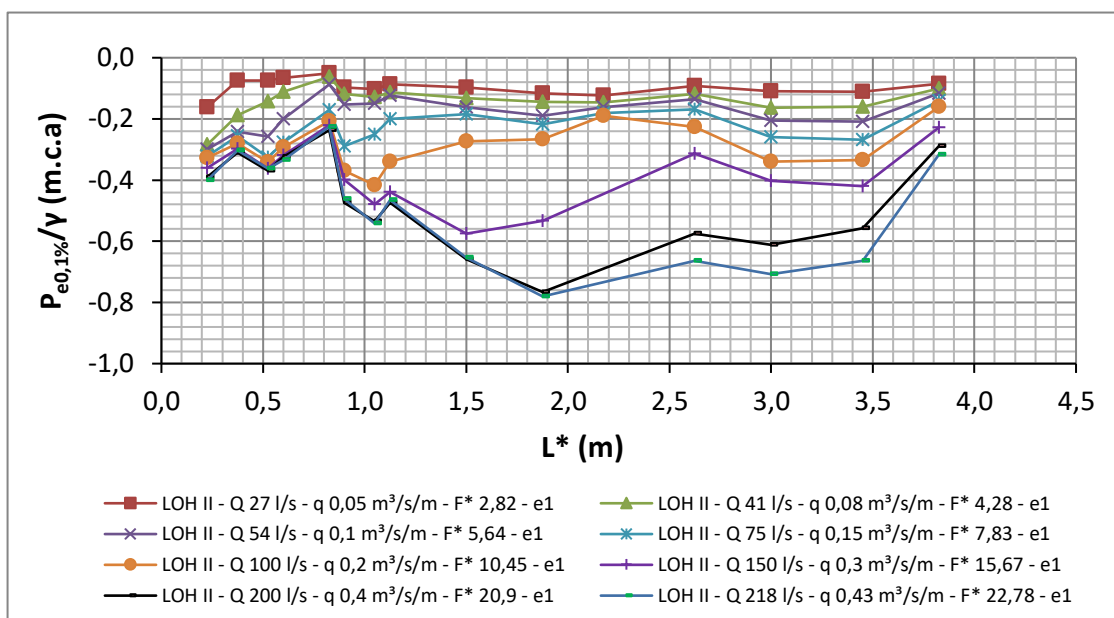


Figura 69 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH II.

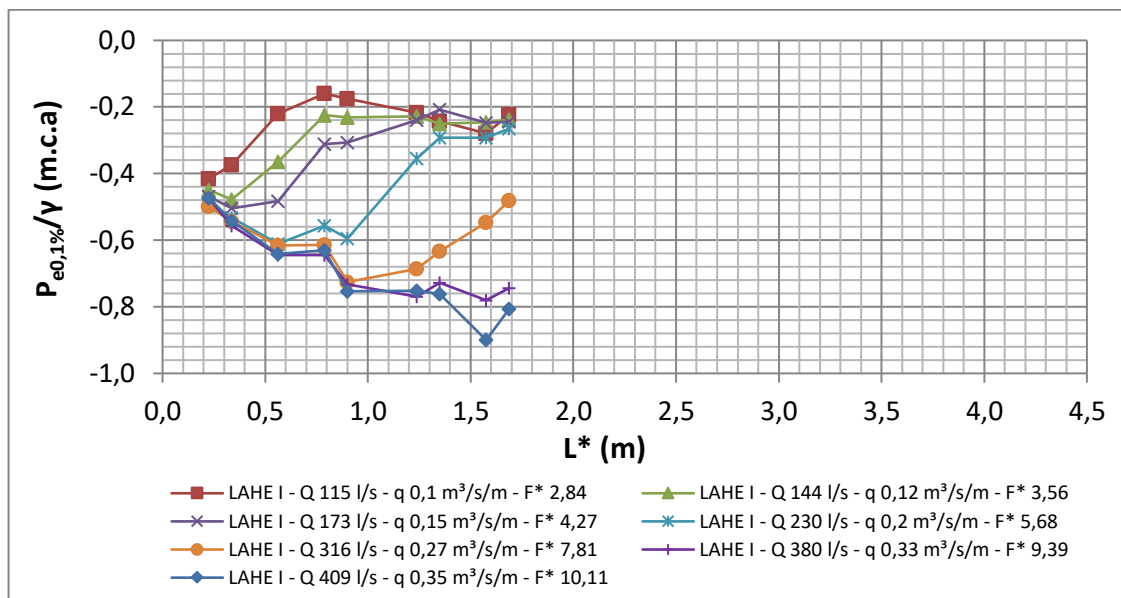


Figura 70 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LAHE.

A declividade de decaimento da distribuição de pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até encontrar a menor pressão das extremas mínimas ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) são semelhantes para calhas com mesma altura de degrau (modelos LOH I e LOH II).

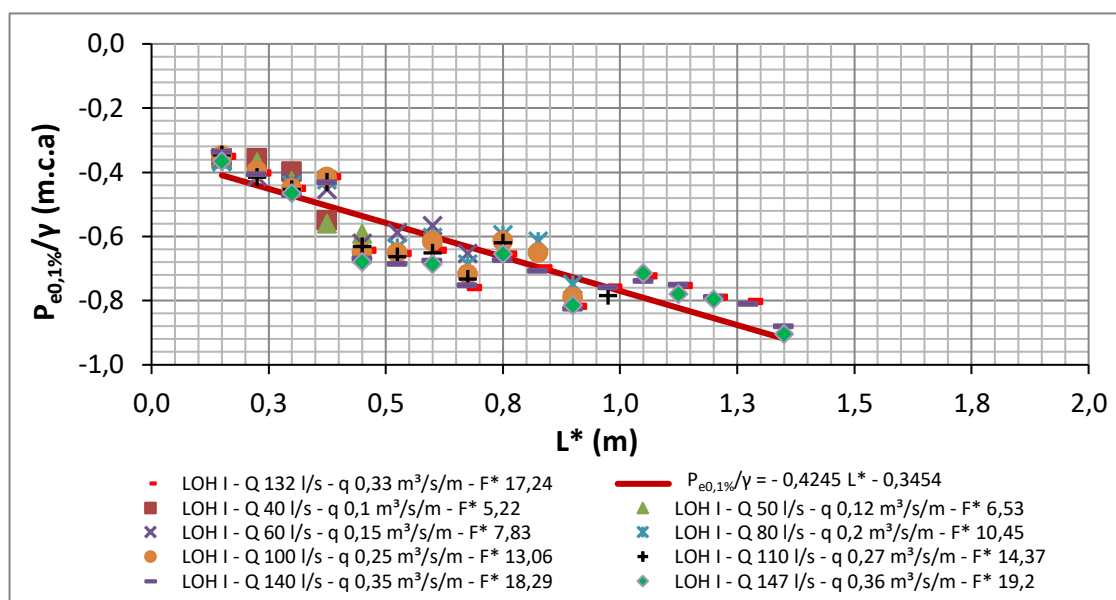


Figura 71 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até a posição de valor de mínima pressão ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) para o modelo LOH I.

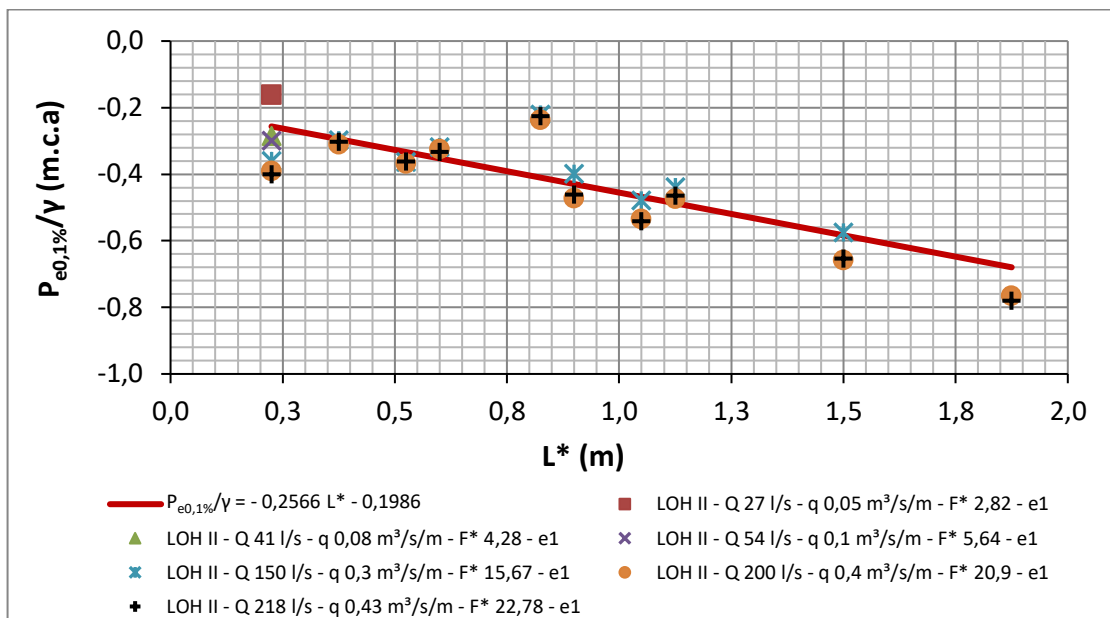


Figura 72 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até a posição de valor de mínima pressão ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) para o modelo LOH II.

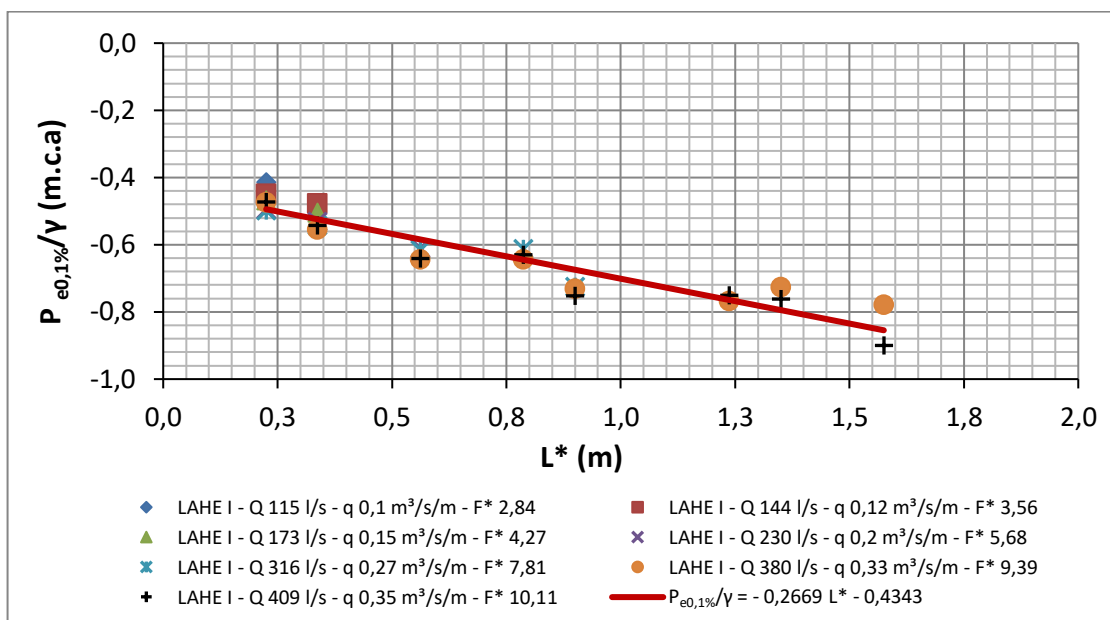


Figura 73 - Distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas extremas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) até a posição de valor de mínima pressão ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) para o modelo LAHE.

Os valores das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) decaem com o aumento da vazão seguindo uma mesma declividade até alcançar a menor pressão extrema mínima ($P_{e0,1\%min/\gamma}$) conforme

Figura 71 , Figura 72 e Figura 73. As declividades da distribuição longitudinal das pressões ao logo da calha encontra-se na Figura 74, onde observa-se que:

- As declividades são semelhantes nos modelos com mesma altura de ogiva (LOH I e LAHE). A pequena diferença de declividade se deve, provavelmente, à diferença nas alturas dos degraus uma vez que as energias para uma mesma posição L^* são semelhantes.
- Os modelos com mesma altura de degrau (LOH I e LOH II), mas ogivas diferentes têm declividades semelhantes, mas com valores de pressão maiores para o modelo de ogiva menor. O motivo para esta diferença pode ser devido à maior energia (maior velocidade) em uma mesma posição L^* para os modelos com maior ogiva.

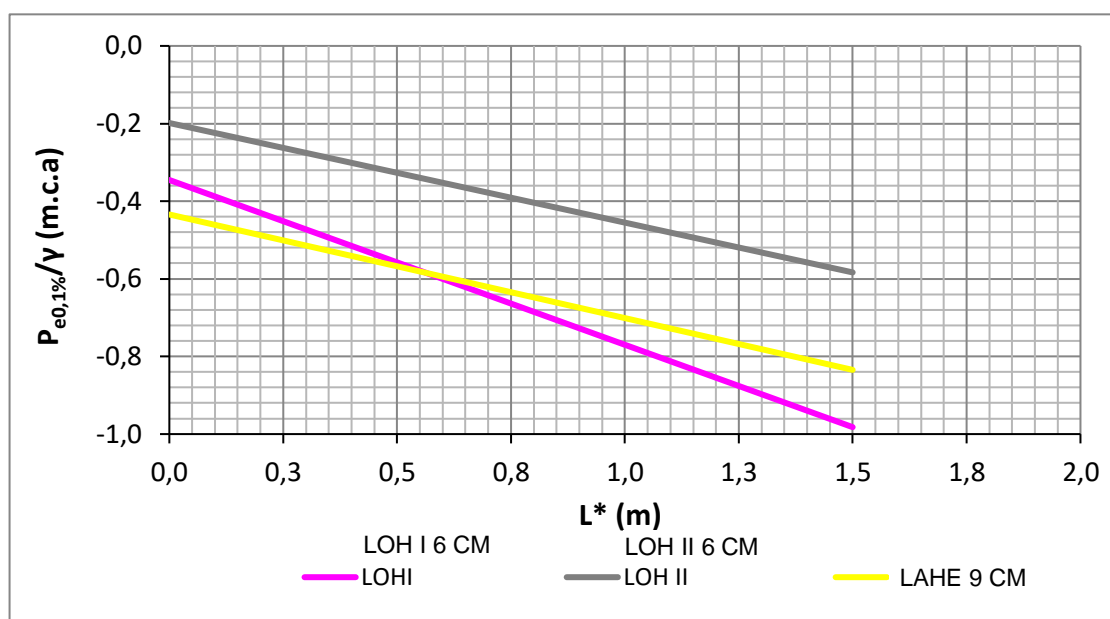


Figura 74 - Comparativo do decaimento dos valores de pressão extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%}/\gamma$) para os 3 modelos em função da posição na calha.

Para um mesmo modelo, com o aumento da vazão específica (q) ou do número de Froude rugoso (F^*) temos que:

- O menor valor das pressões mínimas extremas ($P_{e0,1\%min}/\gamma$) diminui.
- A posição ($L^* = L_{e^*0,1\%min}$), onde ocorre o menor valor das pressões mínimas extremas ($P_{e0,1\%min}/\gamma$), se desloca para jusante (o valor de $L_{e^*0,1\%min}$ aumenta).
- A posição (L^*_n) onde o valor das pressões mínimas extremas passa a oscilar em torno de um valor ($P_{e0,1\%n}/\gamma$) se desloca para jusante.

- Após passar por um mínimo as pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) aumentam de valor até ficarem oscilando em torno de um valor ($P_{en0,1\%/\gamma}$).

5.2.4.1 Definição dos pontos característicos da distribuição de pressões extremas mínimas no espelho.

Do exposto acima é possível observar que a distribuição das pressões extremas mínimas no espelho nas proximidades da quina do degrau apresenta um comportamento característico que pode ser exemplificado pelas Figura 75, Figura 76 e Figura 77 para os três modelos e resumido na Figura 78. Observa-se que a pressão extrema mínima parte de um valor no início dos degraus e decresce até um valor mínimo quando volta a aumentar até uma posição onde passa a oscilar em torno de um valor.

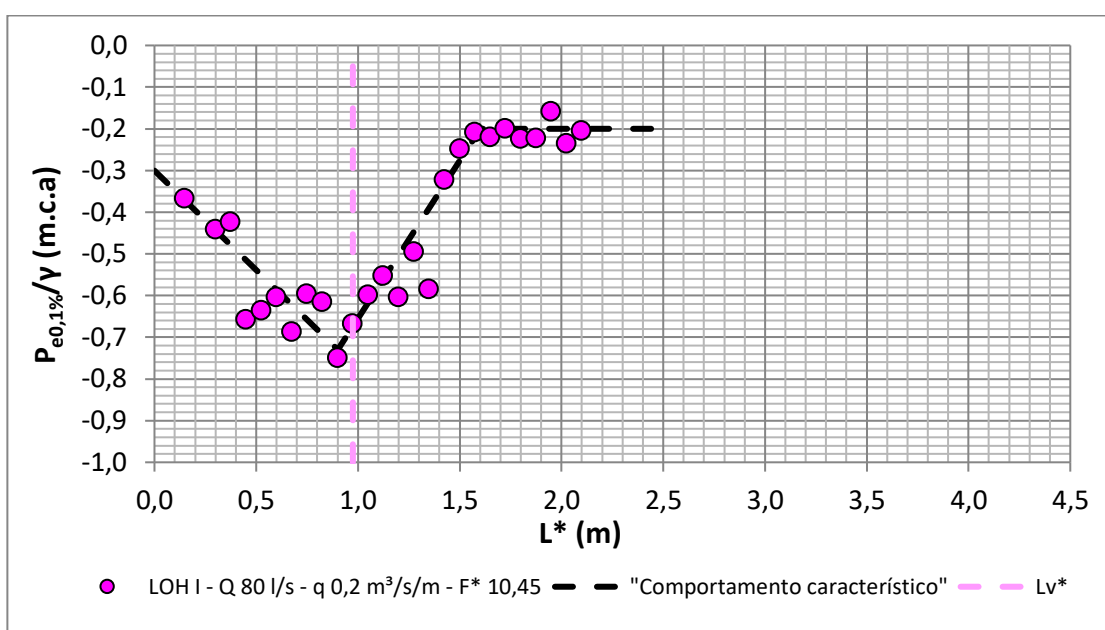


Figura 75 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) para o modelo LOH I ($q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $F^* = 10,45$).

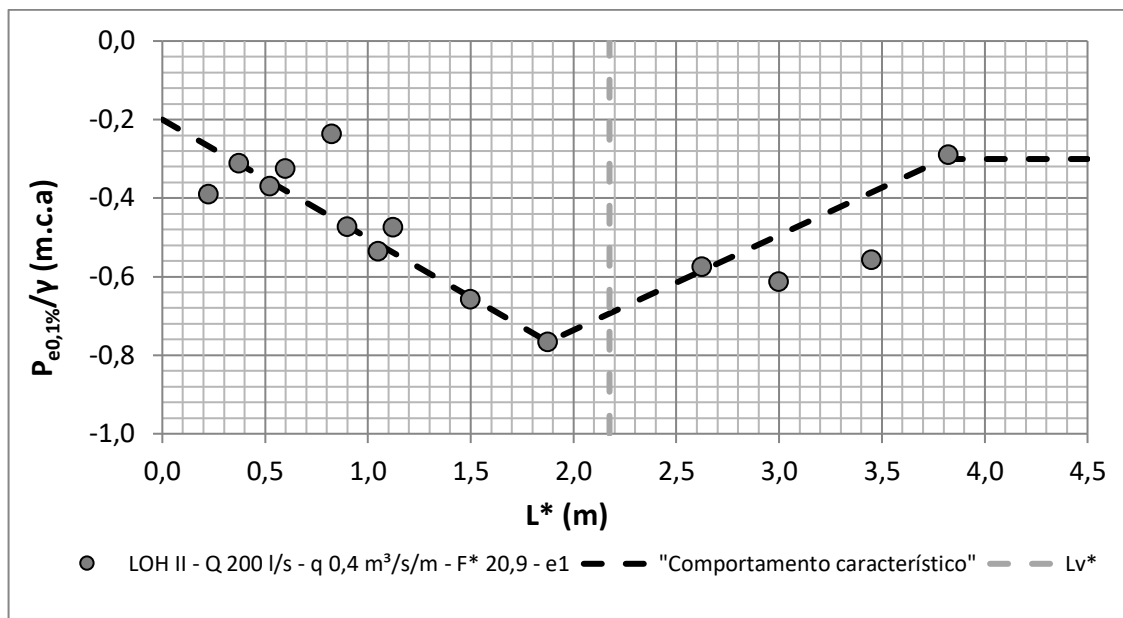


Figura 76 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%}/\gamma$) para o modelo LOH II ($q = 0,4 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $F^* = 20,9$).

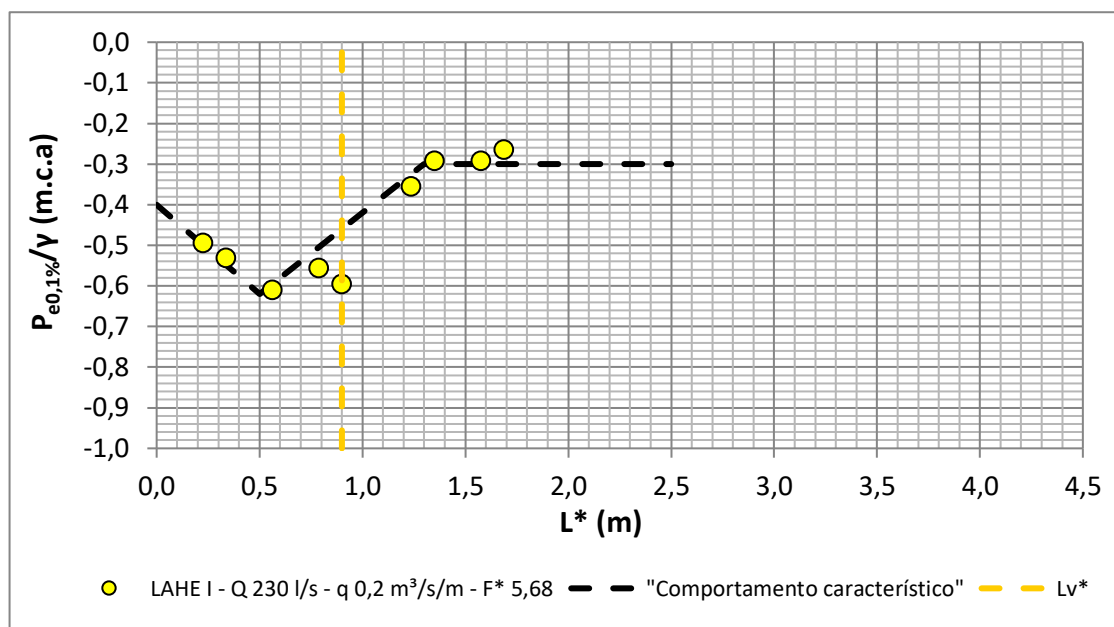


Figura 77 – Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%}/\gamma$) para o modelo LAHE ($q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ou $F^* = 5,68$).

Baseado nesta constatação se buscou determinar os valores das pressões e as posições destes pontos característicos (Figura 78):

- Pressão no início dos degraus (0 ; $P_{ei0,1\%}/\gamma$);
- Posição de menor pressão extrema mínima ($L_{0,1\%min}^*$; $P_{e0,1\%min}/\gamma$);
- Posição onde a pressão extrema mínima passa a oscilar em torno de um valor médio (L_n^* ; $P_{en0,1\%}/\gamma$).

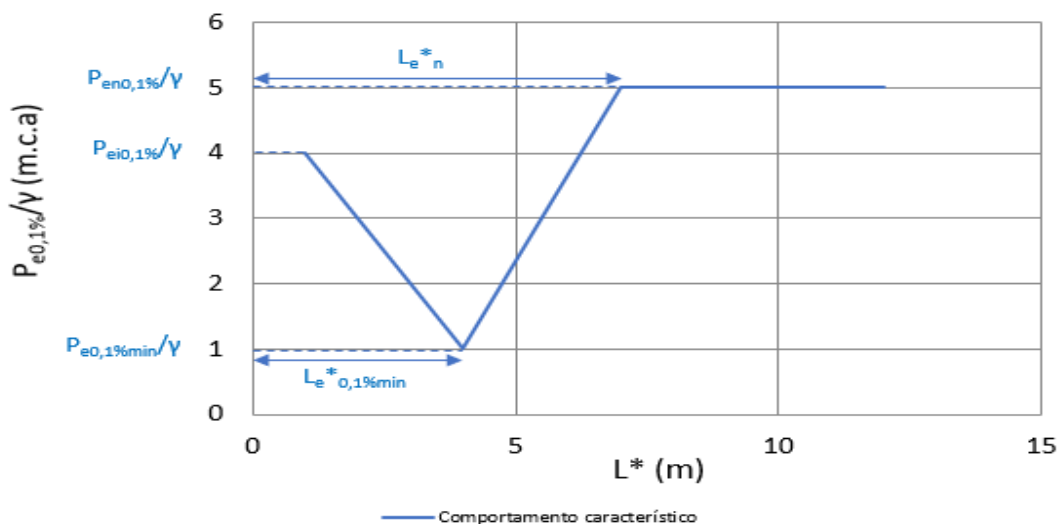


Figura 78 – Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%/\gamma}$) em função de L^* .

5.2.4.1.1 Pressão no início dos degraus → definida pelas coordenadas (0; $P_{e0,1\%/\gamma}$)

Analisando-se os três modelos foi possível determinar quais pressões extremas mínimas ocorrem nos espelhos no início dos degraus. No anexo F encontra-se os valores tabelados destas pressões. De posse destes dados se fez uma adimensionalização das pressões extremas mínimas que ocorrem no espelho no início da calha em degraus, considerando as características geométricas das estruturas e hidráulicas do escoamento. A Figura 79 e a Figura 80 apresentam os parâmetros utilizados na adimensionalização e o resultado da mesma.

Os parâmetros indicados na Figura 79 são:

Z = energia total em relação ao ponto característico em questão (m)

$$Z = 1,5 h_c + y_j + N_d h_d$$

h_c = altura crítica do escoamento (m) $h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$

y_j = altura da ogiva (m)

N_d = número de degraus até o ponto característico em questão (m)

h_d = altura do degrau (m)

A curva da Figura 80 pode ser representada pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** abaixo:

$$\frac{\left(\frac{P_{ie}}{\gamma}\right) h_d}{Z_i h_c} = -0,0437 - \frac{1,3426}{F^*}$$

Equação 32

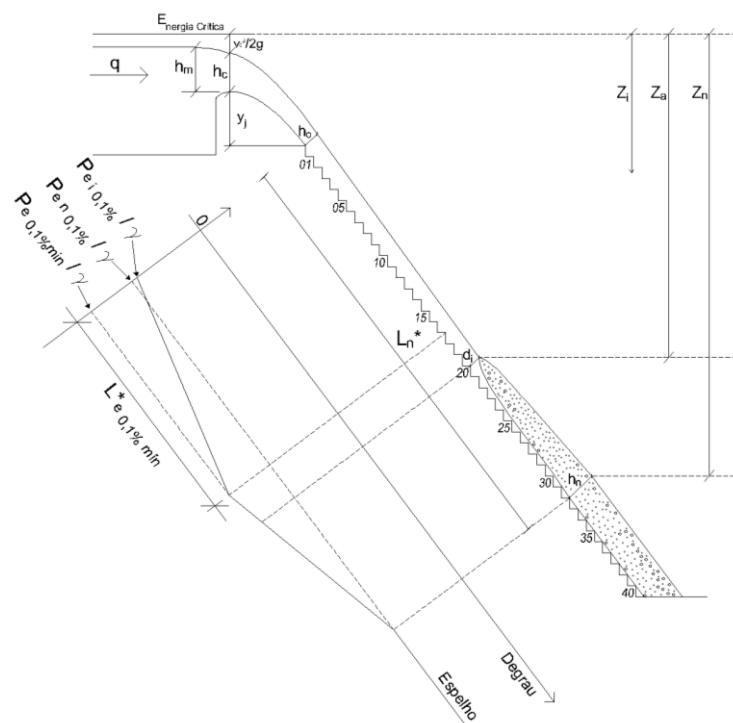
Válida para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,98$ 

Figura 79 - Parâmetros hidráulicos e geométricos considerados na adimensionalização das pressões mínimas extremas no espelho e início dos degraus ($0; P_{10,1\%/\gamma}$).

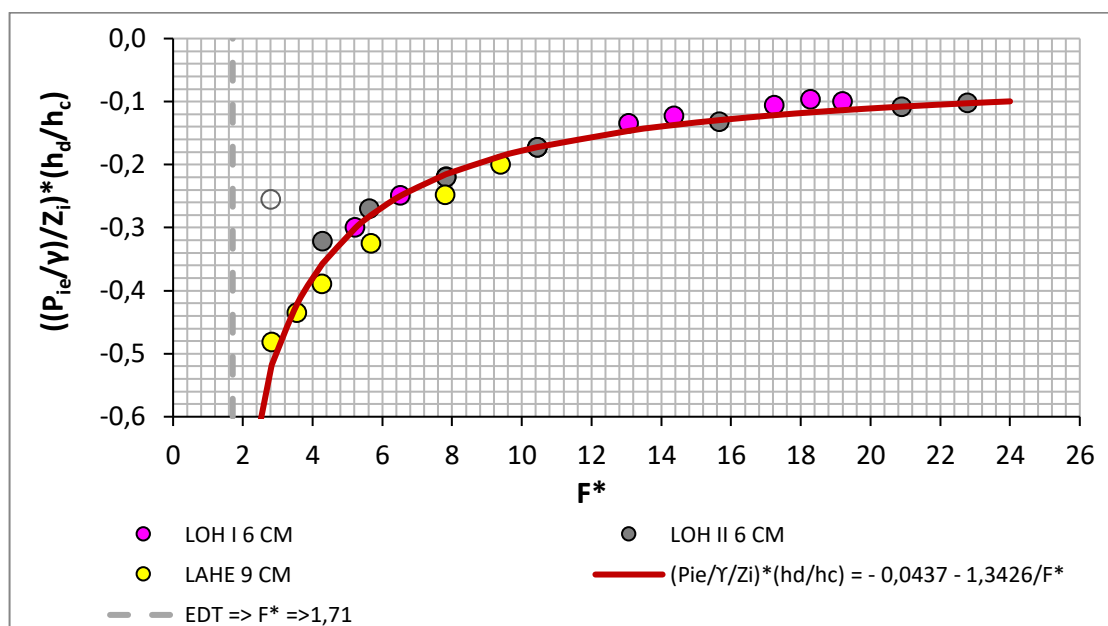


Figura 80 - Adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho no início dos degraus ($0; P_{10,1\%/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro.

A Figura 81 apresenta a adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho no início dos degraus ($0; P_{i0,1\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão dos dados de outros autores. Observa-se que a dispersão na adimensionalização aumentou. Entretanto, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos dimensionais utilizados. Esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório (tamanho da tomada, existência de mangueira ou não nas medições, medições em somente alguns degraus, precisão dos transdutores etc.).

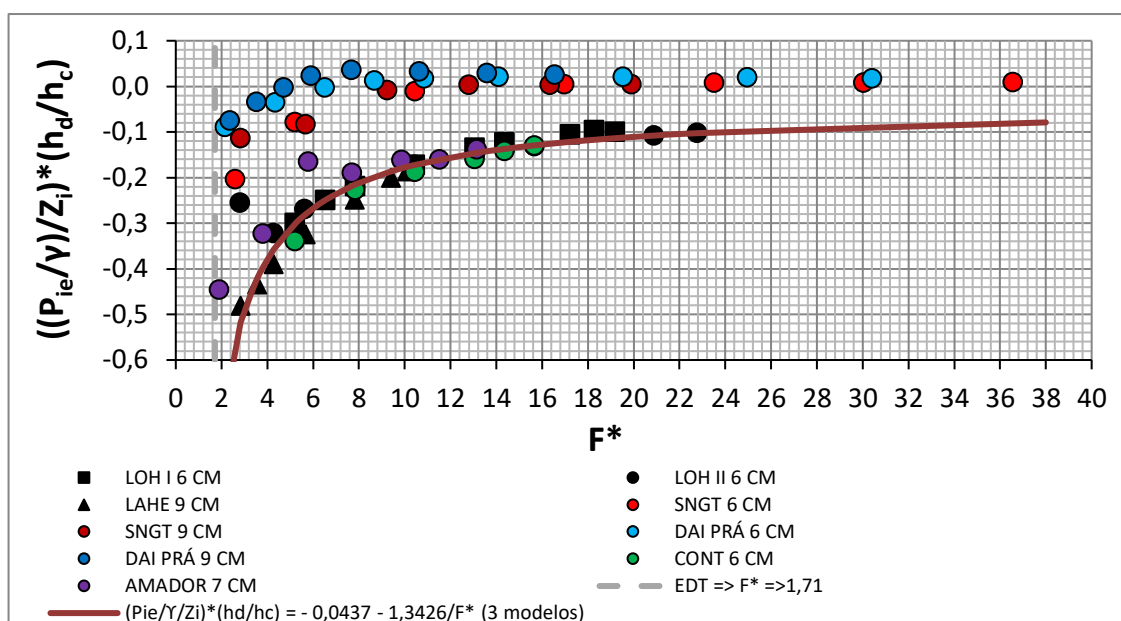


Figura 81 - Adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho no início dos degraus ($0; P_{i0,1\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores.

5.2.4.1.2 Posição de menor pressão extrema mínima ($L_{e0,1\%min}^*$; $P_{e0,1\%min}/\gamma$)

Usando-se a mesma metodologia da análise anterior, se pode estimar as coordenadas do ponto de menor pressão extrema mínima ($L_{e0,1\%min}^*$; $P_{e0,1\%min}/\gamma$). A posição onde ocorrem as pressões extremas mínimas foi adimensionalizada em função da rugosidade do degrau (k) e do número de Froude rugoso (F^*) e pode ser observada a partir da Figura 82. A curva da Figura 82 pode ser representada pela equação abaixo, onde se pode observar que o aumento da posição onde ocorrem as pressões mínimas é diretamente proporcional ao número de Froude rugoso. Como já foi salientado anteriormente, para números de Froude rugoso menores que 1,71 o escoamento não é deslizante sobre turbilhões (EDT), não sendo válida a equação.

$$\frac{L_{e0,1\%min}^*}{k} = 2,3523F^* - 1,6623 \quad \text{Equação 33}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,92$

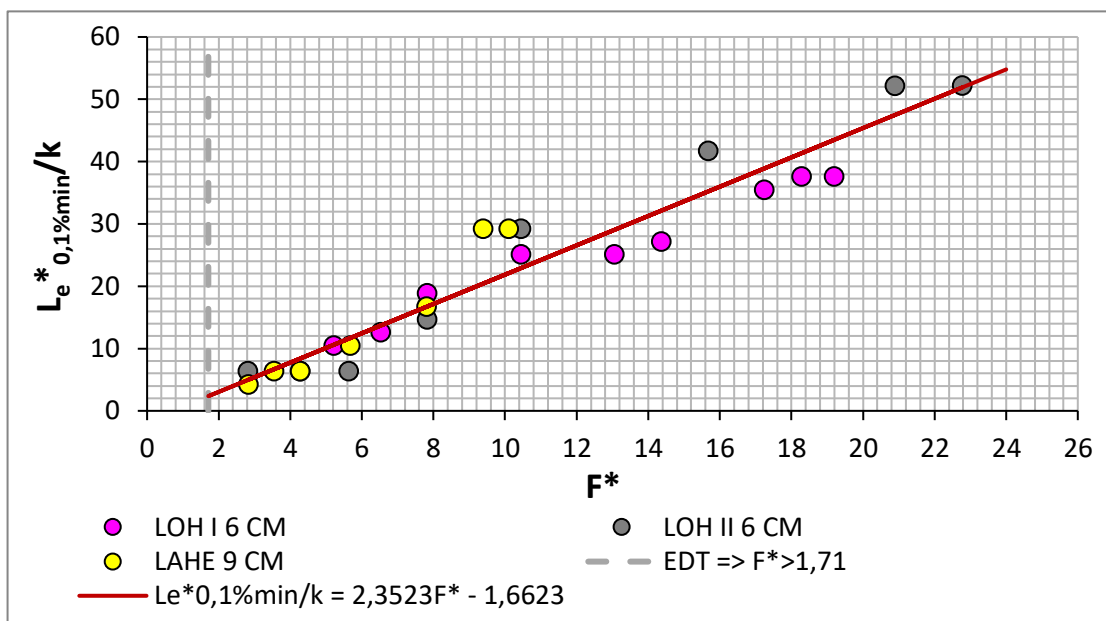


Figura 82 - Adimensionalização das posições onde ocorrem os menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ($L_{e0,1\%min}^*$; $P_{e0,1\%min}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro.

Comparando-se a relação entre a posição adimensionalizada onde ocorrem os menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ($L_{e0,1\%min}^*/k$) com a posição visual (L_v^*/k) do início da aeração, se observa, na Figura 83, que com o aumento do número de Froude rugoso (F^*) ou da vazão específica, há um decaimento assintótico desta relação até o valor de 1,20. Ou seja, o ponto onde os menores valores das pressões extremas mínimas ocorrem ($L_{e0,1\%min}^*$) está a montante do ponto visual de início da aeração visual (L_v^*). A Equação 34 abaixo mostra a relação entre as duas posições de início da aeração ($L_{e0,1\%min}^*$ e L_v^*). Em uma estimativa se pode dizer que as pressões mínimas ocorrem a a montante do local da posição de início da aeração visual.

$$1,46 \geq \frac{\frac{L_v^*}{k}}{\frac{L_{e0,1\%min}^*}{k}} = \frac{2,8037F^* - 1,1378}{2,3523 * F^* - 1,6623} > 1,20 \quad \text{Equação 34}$$

Para $F^* > 1,71$

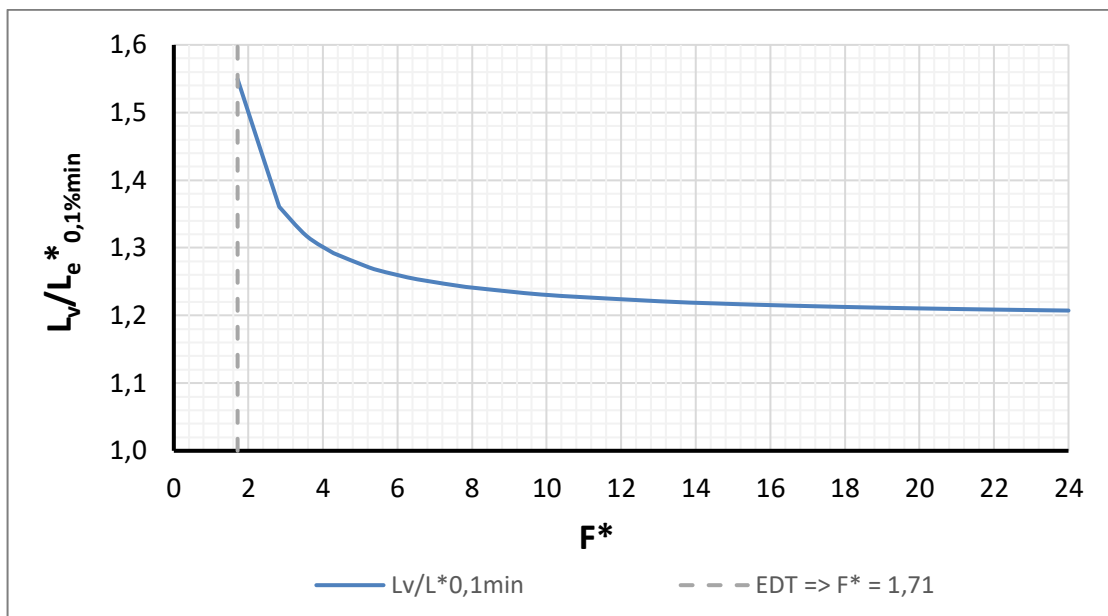


Figura 83 - Relação entre a posição adimensionalizada onde ocorrem os menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ($L_e^*_{0,1\%min}$) com a posição visual (L_v^*) do início da aeração e o número de Froude rugoso.

GOMES (2003) e AMADOR (2005), já haviam observado que as pressões mínimas ocorriam entre as posições $-4 \leq s' \leq 4$, sendo que $s' = 0$ indica onde ocorreu o início da aeração determinada visualmente.

A Figura 84 apresenta a adimensionalização das posições onde ocorrem os valores das menores pressões extremas mínimas no espelho (L^*_{Pmin} ; $P_{e0,1\%min}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão dos dados de outros autores. Observa-se que a dispersão na adimensionalização aumentou. Entretanto, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados. Como explicado anteriormente, esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório. A equação apresentada na Figura 84 utilizou somente os dados dos demais autores que se tem certeza que passaram pelo mínimo. Os dados vazados na Figura 84 indicam pontos que não se tem certeza se alcançaram o valor mínimo, em função de o modelo não ter altura suficiente ou não se ter medições nas proximidades de onde ocorreu o mínimo.

$$\frac{L^*_{0,1\%minoutros}}{k} = 2,2268F^* - 0,9987 \quad \text{Equação 35}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,76$

Quando se compara as equações de ajuste da posição de início da aeração dos 3 modelos deste trabalho (LOH I, LOH II e LAHE) com a equação obtida com os

dados dos outros autores, se observa que, com o aumento do número de Froude rugoso (F^*) ou da vazão específica há um decaimento assintótico desta relação que pode variar de 1,16 até o valor de 0,97 (Figura 85). Portanto, julga-se que a equação do presente trabalho pode ser utilizada para determinar a posição onde ocorre o menor valor da pressão extrema mínima.

$$1,16 \geq \frac{\frac{L_{e,0,1\%min}^* (\text{outros autores})}{k}}{\frac{L_{e,0,1\%min}^*}{k}} = \frac{2,2268F^* - 0,9987}{2,3523F^* - 1,6623} > 0,97 \text{ para } F^* > 1,71 \quad \text{Equação 36}$$

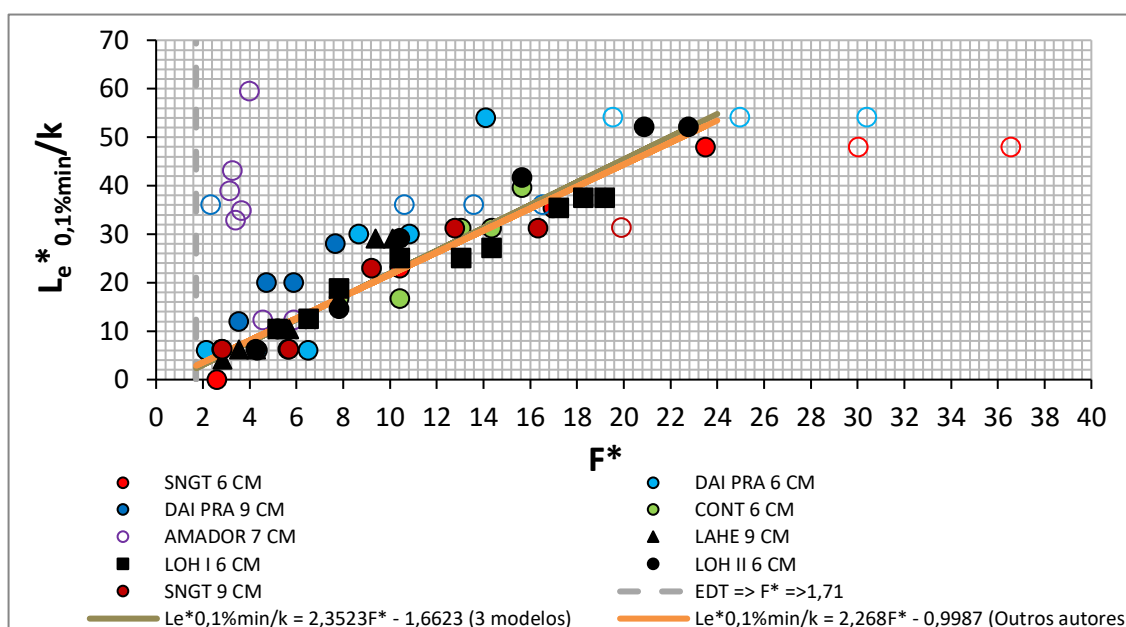


Figura 84 - Adimensionalização da posição ($L_{e,0,1\%min}/k$) onde ocorrem os valores das menores pressões extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%min}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de menor pressão extrema mínima.

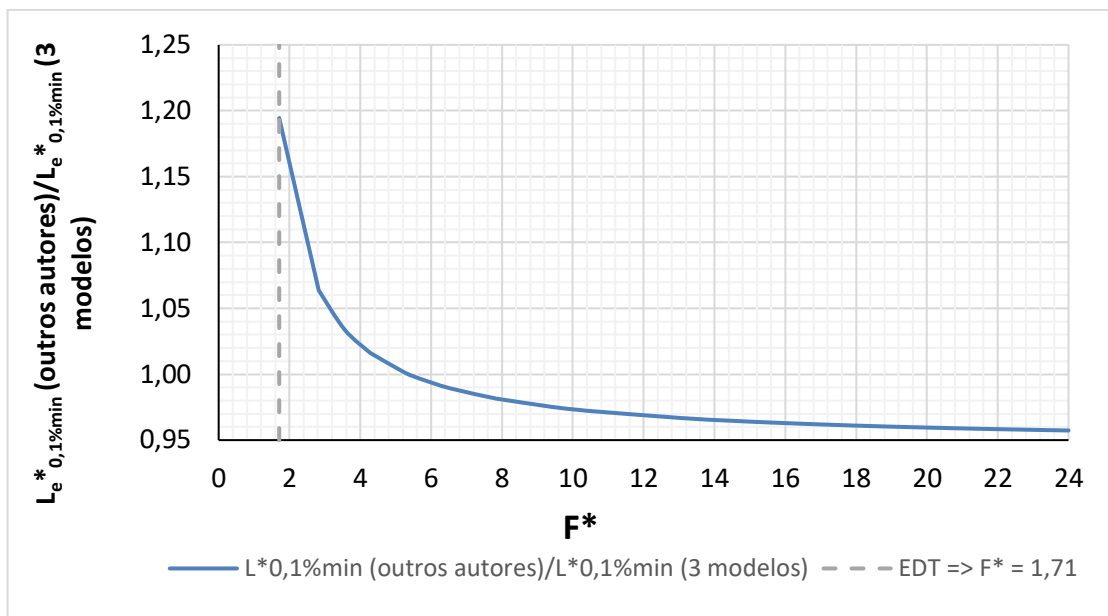


Figura 85 - Relação entre a posição adimensionalizada onde ocorrem os valores das mínimas pressões extremas mínimas no espelho considerando os dados obtidos por outros autores ($L_{e^*0,1\%min}/k$)_{outros} e aqueles do presente estudo ($L_{e^*0,1\%min}/k$) em função do número de Froude rugoso.

A adimensionalização das menores pressões extremas mínimas ($P_{e0,1\%min}/\gamma$) está apresentada na Figura 86. A equação que pode representar esta curva está apresentada abaixo.

$$\frac{\left(\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(F^*) - 0,5664 \quad \text{Equação 37}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,90$

Considerar:

$$\frac{\left(\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = -0,058 \quad \text{Equação 38}$$

Válida para $F^* > 24$

em função da Figura 86.

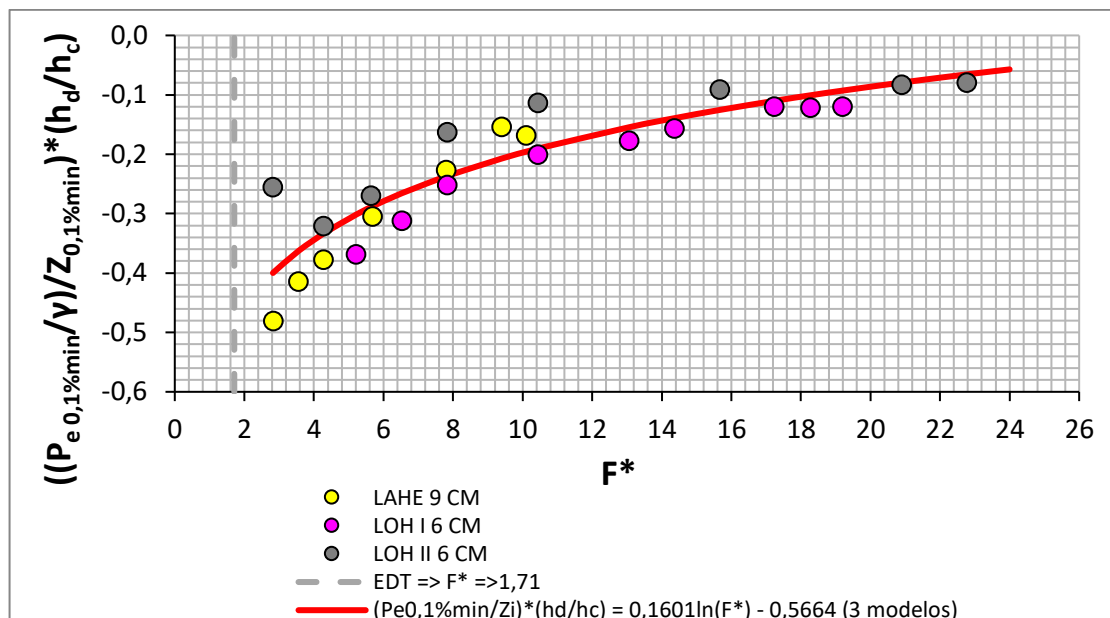


Figura 86 - Adimensionalização dos menores valores das pressões extremas mínimas no espelho $\frac{(P_{e0,1\%min})}{\gamma} \frac{h_d}{Z_{0,1\%min} h_c}$ em função do número de Froude rugoso do vertedouro para os modelos LOH I, LOH II e LAHE.

A Figura 87 apresenta a adimensionalização dos menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ($L_{e^*0,1\%min}$; $P_{e0,1\%min}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso com a inclusão dos dados de outros autores. Observa-se que não é possível identificar uma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados. No entanto, com os dados dos três modelos do presente estudo é possível afirmar que a Equação 37 está a favor da segurança por apresentar pressões mínimas extremas inferiores às dos demais autores.

$$F^* = \text{constante} \Rightarrow \left(\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma} \right)_{\text{outros}} \geq \left(\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma} \right)_{3 \text{ modelos}}$$

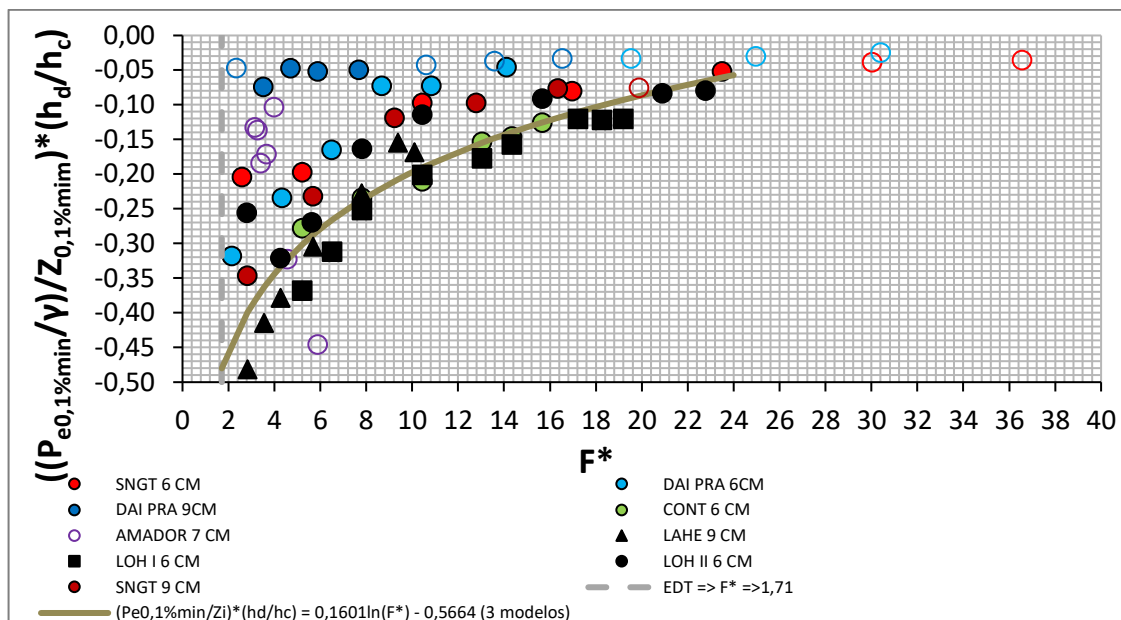


Figura 87 - Adimensionalização dos valores mínimos de pressões extremas mínimas no espelho ($P_{e0,1\%min}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores. Para os pontos vazados, não se tem a certeza que o escoamento alcançou o ponto de pressão extrema mínima.

5.2.4.1.3 Posição onde a pressão extrema mínima passa a ser constante (Le_n^* ; $P_{e0,1\%}/\gamma$).

Da mesma maneira que foram analisadas as outras posições características, se fez a análise para quando a pressão extrema mínima passa a ser constante. A Figura 88 apresenta a posição onde isto ocorre que pode ser estimada pela equação abaixo.

$$\frac{Le_n^*}{k} = 4,0231 F^* + 0,9448 \quad \text{Equação 39}$$

$$\text{Válida para } 1,71 < F^* \leq 24 \quad R^2 = 0,90$$

Observa-se que com o aumento de F^* ou da vazão específica a posição L_n^* aumenta.

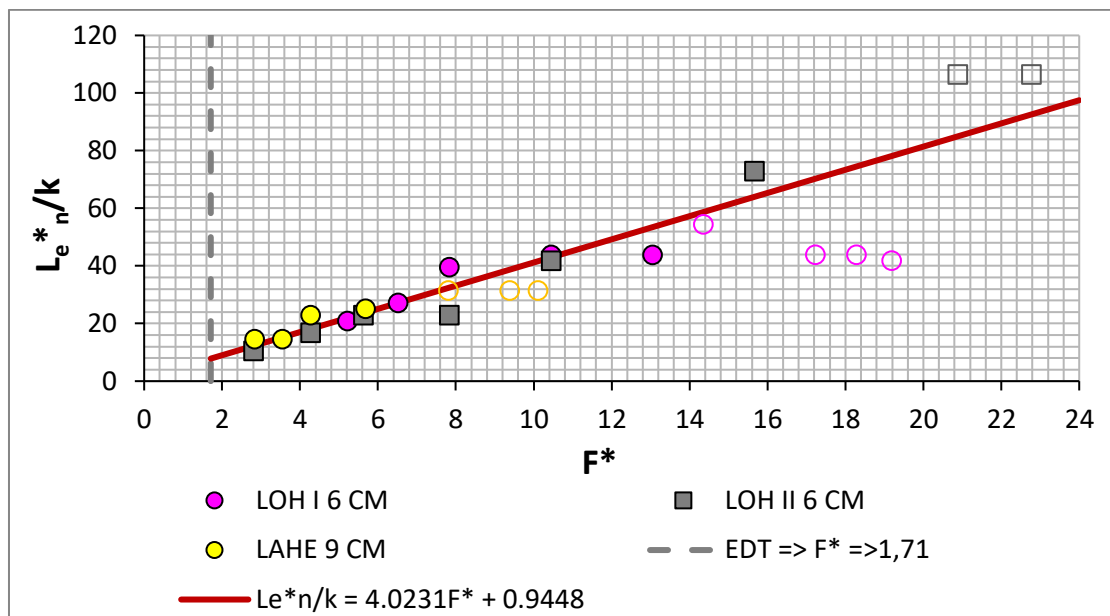


Figura 88 - Adimensionalização da posição do ponto (L_{e^*n}) onde a pressão extrema mínima passa a ser constante ($P_{n0,1\%/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro. Para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de pressão constante para as extremas mínimas.

A Figura 89 apresenta a adimensionalização das posições onde a pressão extrema mínima passa a ser constante ($P_{en0,1\%/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão dos dados de outros autores. Observa-se que a dispersão na adimensionalização aumentou. Entretanto, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados. Como explicado anteriormente, esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório. A equação apresentada na Figura 89 utilizou somente os dados dos demais autores que se tem certeza que passaram pelo valor de pressão constante. Os dados vazados na Figura 89 indicam pontos que não se tem certeza se alcançaram esta pressão.

$$\frac{L_{e^*n}}{k} = 2,5043 F^* + 15 \quad \text{Equação 40}$$

Válida para declividade 1:0,75 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,7$

Válida para declividade 1:0,80 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,65$

Válida para declividade 1:1,00 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,50$

Comparando-se os resultados obtidos pelos três modelos com os obtidos por outros autores se observa que a diferença entre a equação de previsão a partir dos dados dos três modelos em relação ao valor obtido a partir dos demais autores:

$$\text{Para } F^* = 1,71 \Rightarrow (L_{e^*n}/k)_{3 \text{ modelos}} / (L_{e^*n}/k)_{\text{outros}} \approx 0,28$$

$$\text{Para } F^* = 9,0 \Rightarrow (L_{e^*n}/k)_{3 \text{ modelos}} / (L_{e^*n}/k)_{\text{outros}} \approx 1,00$$

$$\text{Para } F^* = 24 \Rightarrow (L_{e^*n}/k)_{3 \text{ modelos}} / (L_{e^*n}/k)_{\text{outros}} \approx 1,30$$

Como explicado anteriormente esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório.

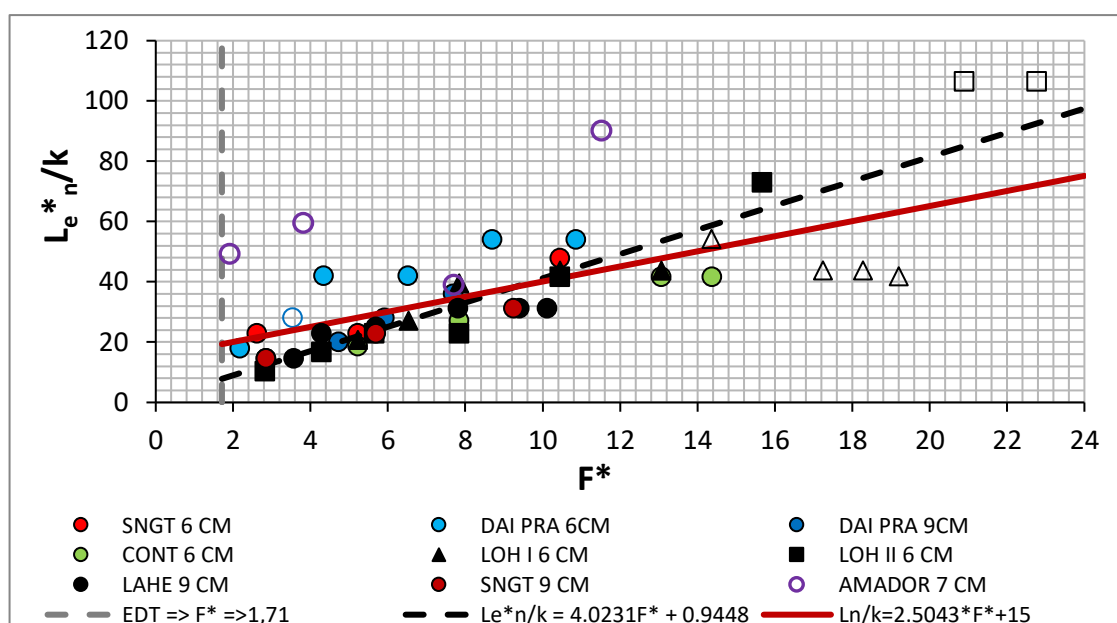


Figura 89 -- Adimensionalização da posição do ponto (L_{e^*n}) onde a pressão extrema mínima passa a ser constante ($P_{n0,1\%/ \gamma}$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro. Para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de pressão constante para as extremas mínimas.

A Figura 90 apresenta o comparativo entre as posições adimensionalizadas (L_v^*/k), ($L_{e^*0,1\%min}/k$) e (L_{en^*}/k) em função do número de Froude rugoso do vertedouro para os ajustes feitos com os dados dos modelos LOH I, LOHII e LAHE. Observa-se que a posição onde ocorre a menor pressão extrema mínima ($L_{e^*0,1\%min}/k$) ocorre antes da posição visual do início da aeração (L_v^*/k). A posição onde as pressões oscilam em torno de um valor (L_{en^*}/k) ocorre depois. Para uma análise preliminar, podendo-se estimar que:

$$(L_v^*/k) / (L_{e^*0,1\%min}/k) \approx 1,20$$

$$(L_n^*/k) / (L_{e^*0,1\%min}^*/k) \approx 1,75$$

$$(L_n^*/k) / (L_v^*/k) \approx 1,45$$

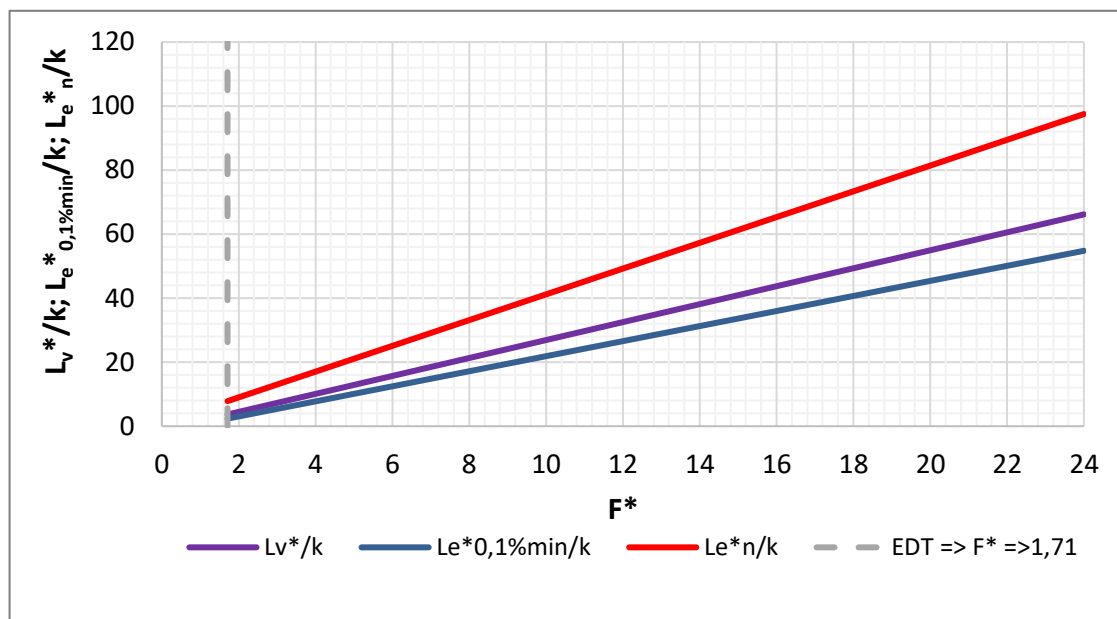


Figura 90 - Comparativo entre as equações das posições características adimensionalizadas (L_v^*), ($L_{e^*0,1\%min}$) e (L_{en}^*) em função do número de Froude rugoso do vertedouro.

A adimensionalização dos valores das pressões extremas mínimas a partir do qual passam a oscilar entorno de um valor está apresentada na Figura 91. Deve ser ressaltado que para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de pressão constante para as extremas mínimas. A equação que pode representar esta tendência está apresentada abaixo.

$$\frac{P_{en0,1\%}}{\gamma} = -1,63 \quad \text{Equação 41}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24$

Sendo $q_2 > q_1$ e $F_{2^*} > F_{1^*} \Rightarrow (P_{en0,1\%}/\gamma)_2 \approx (P_{en0,1\%}/\gamma)_1$

$$(P_{en0,1\%}/\gamma)_2 / (P_{en0,1\%}/\gamma)_1 \approx 1$$

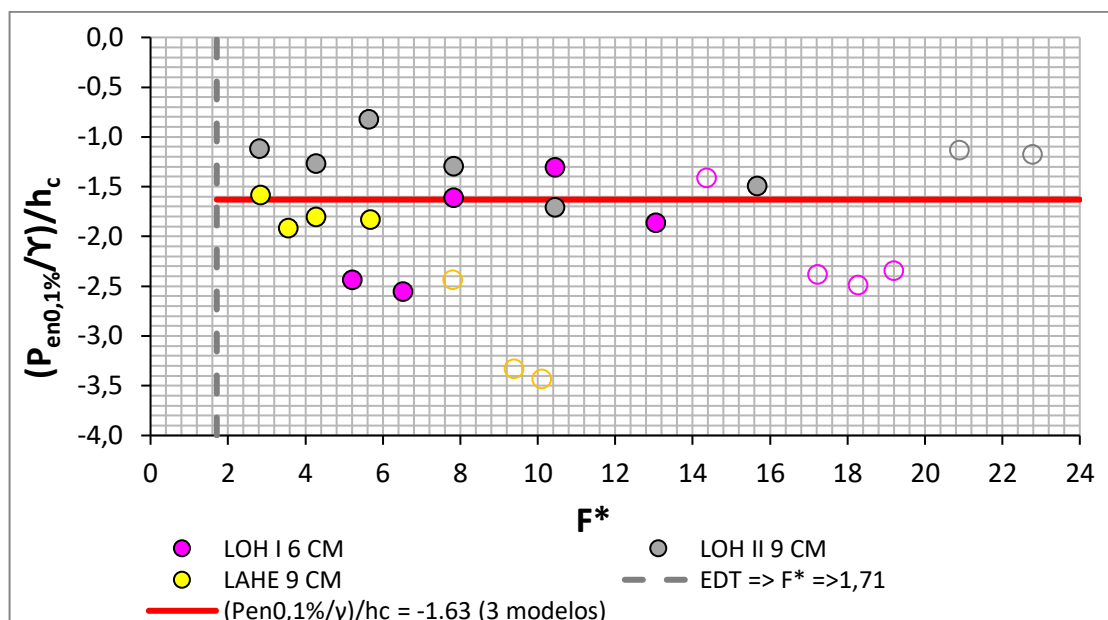


Figura 91 - Adimensionalização das pressões extremas mínimas no espelho onde a mesma passa a ser constante $(P_{en0,1\%}/\gamma)$ pela altura crítica, em função do número de Froude rugoso do vertedouro.

A Figura 92 apresenta a adimensionalização das pressões mínimas extremas no espelho onde a mesma passa a ser constante $(P_{en0,1\%}/\gamma)$ em função do número de Froude rugoso com a inclusão de dados de outros autores. Pode se observar que a dispersão aumenta em relação aos três modelos do presente trabalho. Entretanto, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados. Como explicado anteriormente esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório. Deve ser ressaltado que para os pontos vazados não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de pressão constante para as extremas mínimas.

Quando da comparação das equações de ajuste entre os valores obtidos nos modelos LOH I, LOH II e LAHE com a equação obtida com os dados dos demais autores, se observa que a relação entre elas ficou em 0,83, independentemente do número de Froude rugoso. Ou seja, se pode utilizar a equação apresentada no presente estudo para a previsão dos valores de pressões mínimas no espelho na região onde o escoamento é praticamente uniforme. Outro aspecto é que os valores do presente estudo estão a favor da segurança, por apresentarem valores de pressão mínima extrema inferiores às dos demais autores.

$$\frac{\left(\frac{P_{en0,1\%}}{\gamma}\right)_{outros}}{\left(\frac{P_{en0,1\%}}{\gamma}\right)_{3\text{ modelos}}} = \frac{-1,35}{-1,63} \Rightarrow \approx 0,83 \quad \text{Equação 42}$$

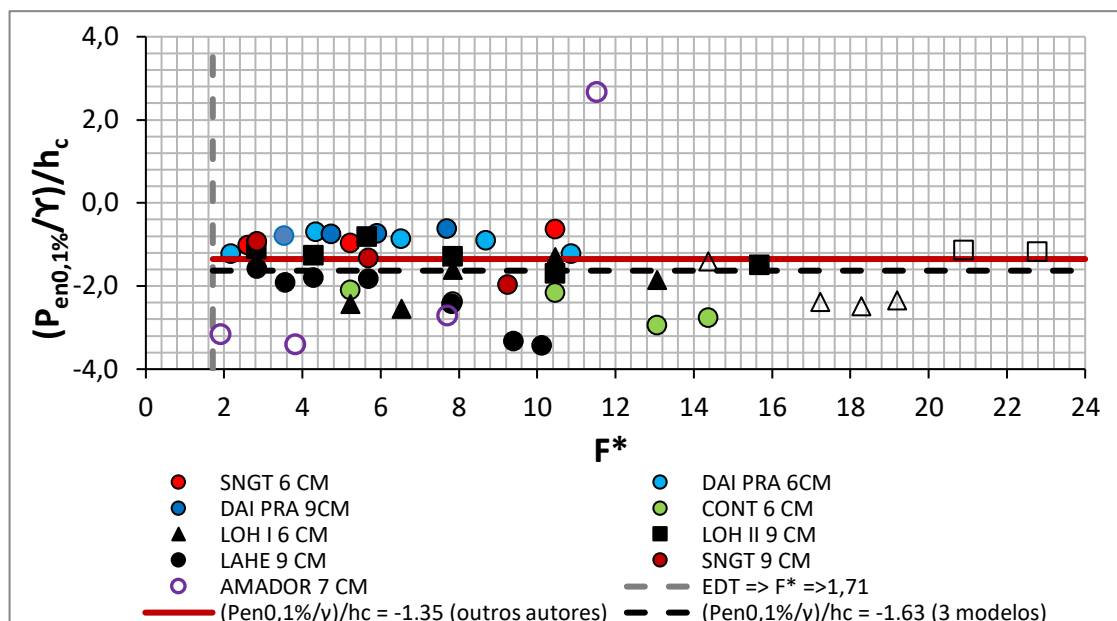


Figura 92 - Adimensionalização das pressões mínimas extremas no espelho dos degraus onde a mesma passa a ser constante $(P_{en0,1\%}/\gamma)$ em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores.

5.2.4.2 Definição dos pontos característicos da distribuição de pressões extremas máximas no patamar.

Para a definição dos pontos característicos da distribuição de pressões extremas máximas no patamar foi feita uma análise do comportamento da distribuição longitudinal das pressões. As Figura 93, Figura 94 e Figura 95 apresentam a distribuição longitudinal dos valores das pressões extremas máximas $(P_{p99,9\%}/\gamma)$ no patamar, onde se pode observar que:

- Para um mesmo modelo e uma mesma vazão específica (q) ou o mesmo número de Froude rugoso (F^*) pode-se observar nas Figura 96, Figura 97 e Figura 98:
 - * O comportamento das pressões extremas máximas no patamar $(P_{p99,9\%}/\gamma)$ cresce até um valor a partir do qual oscila em torno deste valor permanecendo praticamente constante $(P_{p99,9\%max}/\gamma)$.
 - * Este ponto de estabilização das maiores pressões extremas máximas no patamar $(P_{p99,9\%max}/\gamma)$ ocorre próximo da posição $(L_{e^*0,1\%min})$ onde ocorrem as menores pressões extremas mínimas no espelho $(P_{e0,1\%min}/\gamma)$.

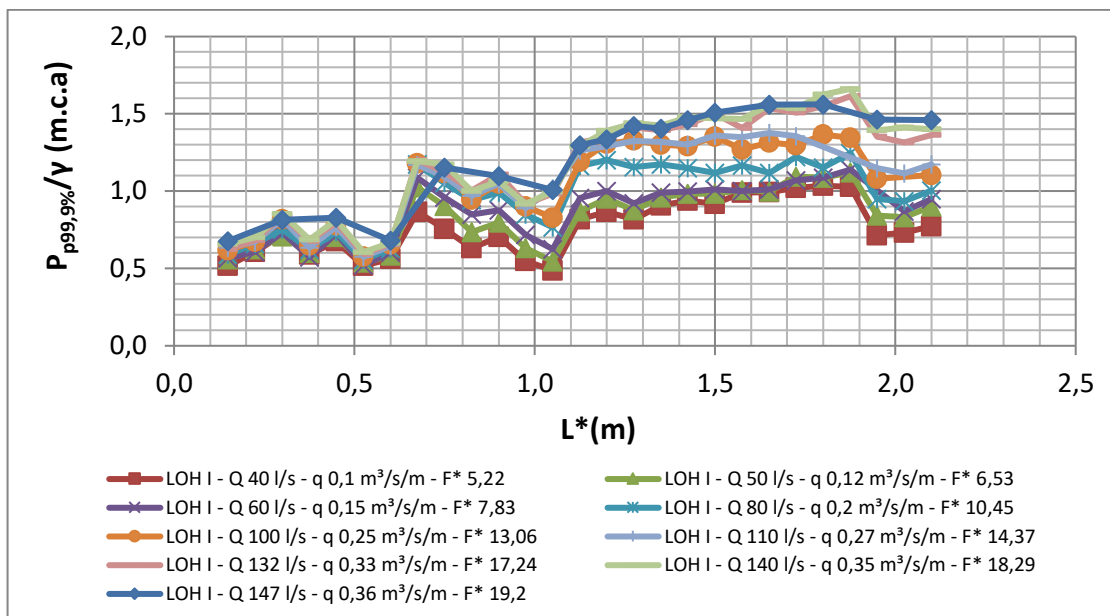


Figura 93 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%/\gamma}$) para o modelo LOH I em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*).

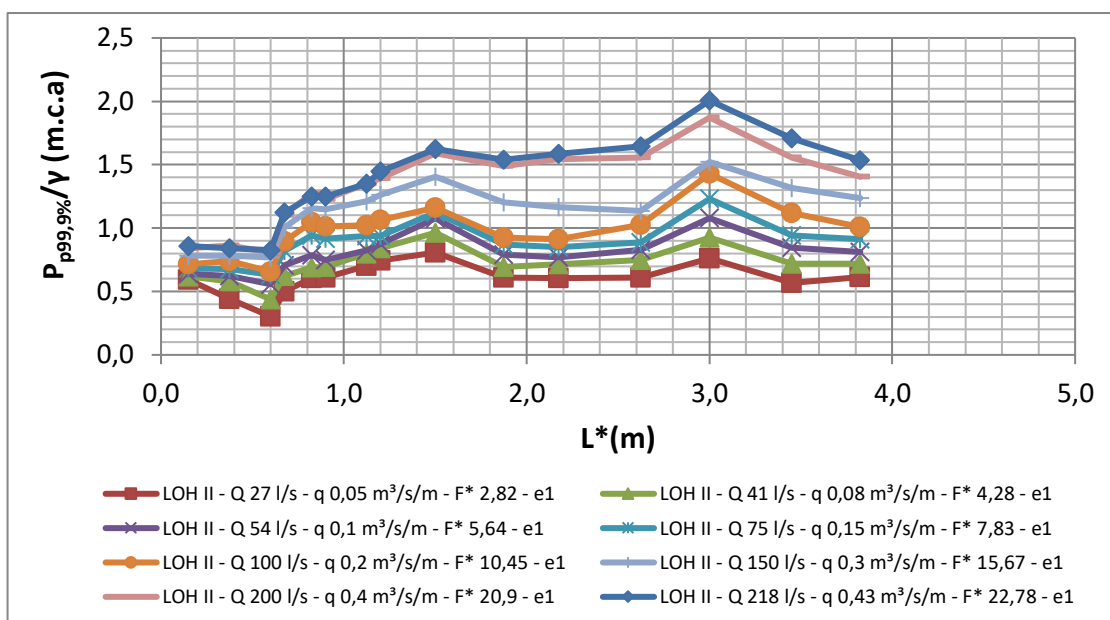


Figura 94 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%/\gamma}$) para o modelo LOH II em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*).

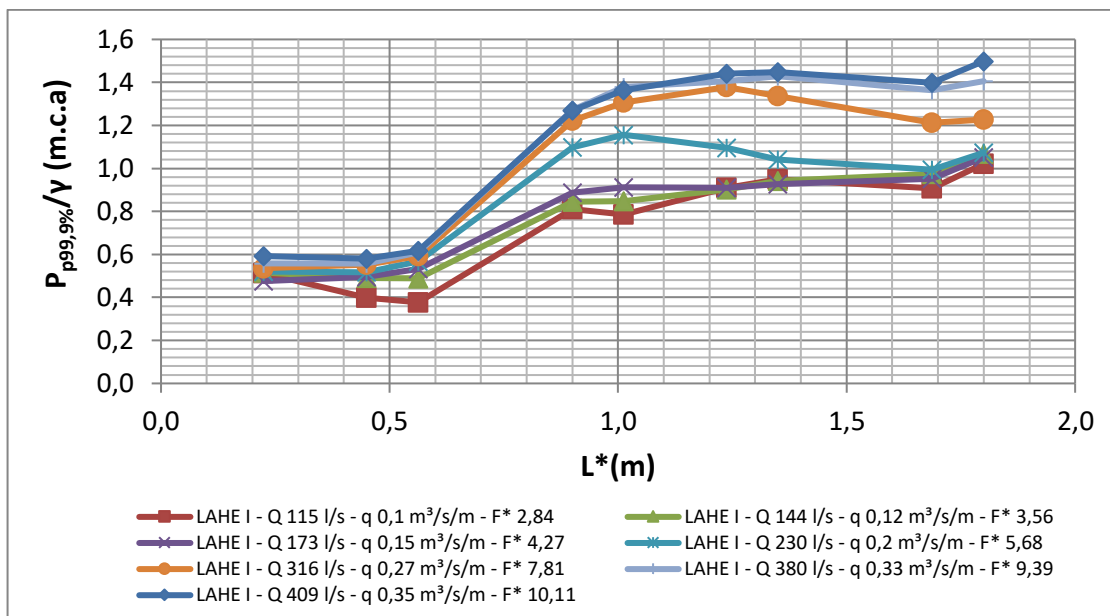


Figura 95 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%/\gamma}$) para o modelo LAHE em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*).

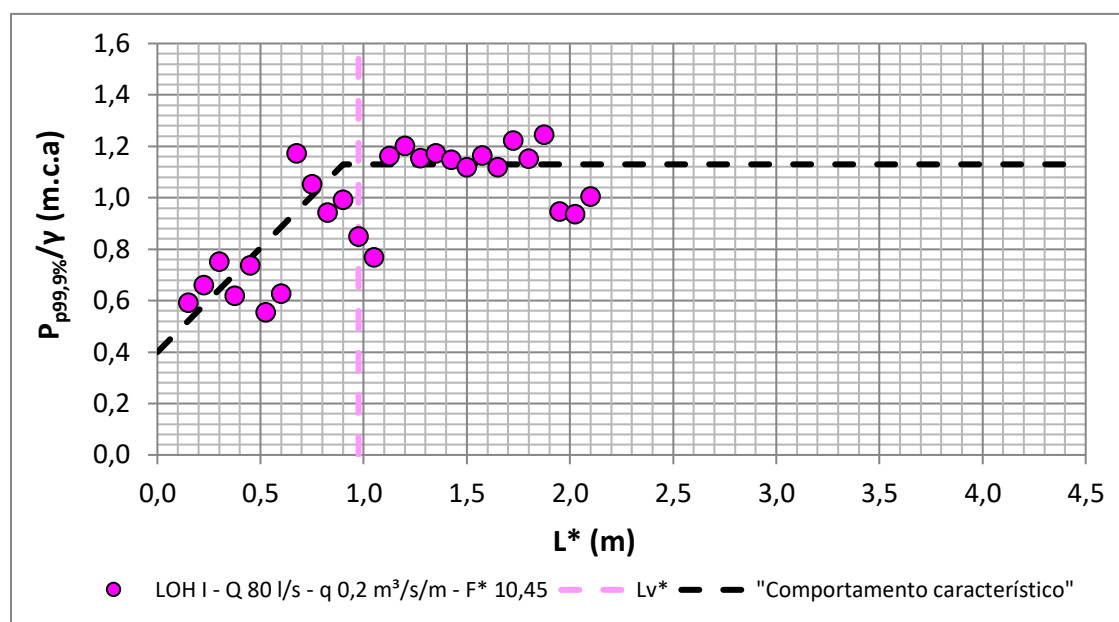


Figura 96 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%/\gamma}$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*) para o modelo LOH I; Froude rugoso de 10,45 ($q = 0,20 \text{ m}^3/\text{s/m}$)

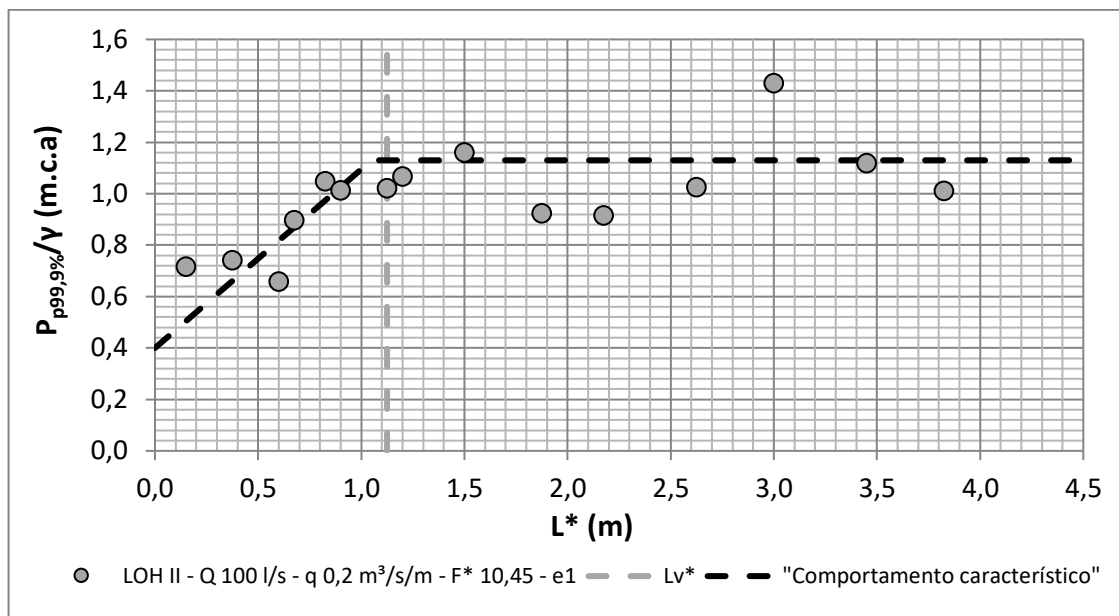


Figura 97 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*) para o modelo LOH II; Froude rugoso de 10,45 ($q = 0,20$ m³/s/m)

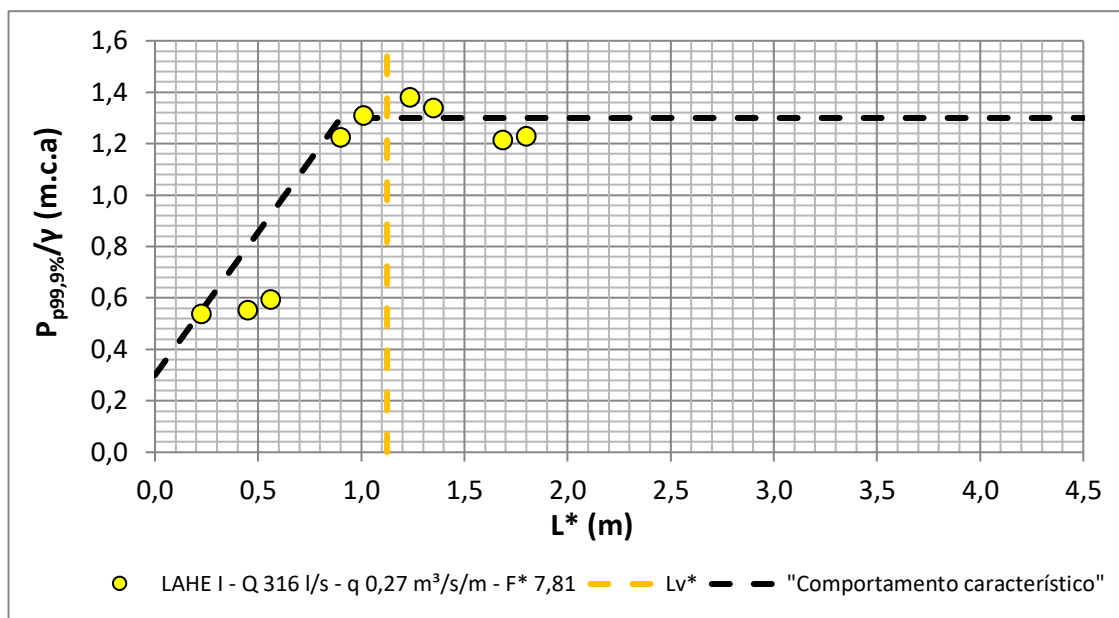


Figura 98 - Distribuição longitudinal das pressões extremas máximas no patamar ($P_{p99,9\%}/\gamma$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*) para o modelo LAHE; Froude rugoso de 7,82 ($q = 0,275$ m³/s/m)

Baseado nas figuras anteriores se observa que as pressões máximas no patamar podem ser definidas por duas posições características (Figura 99): inicial de pressão (0; $P_{ip99,99\%}$) e máxima pressão extrema ($L_{e^*0,1\%min}$; $P_{pn99,9\%max}/\gamma$):

- Máxima pressão extrema ($L_{e^*0,1\%min}$; $P_{pn99,9\%max}/\gamma$);

Para $L^* \geq L_{e^*0,1\%min} \Rightarrow P_{p99,9\%/\gamma} \approx P_{p99,9\%max/\gamma} \approx \text{constante}$

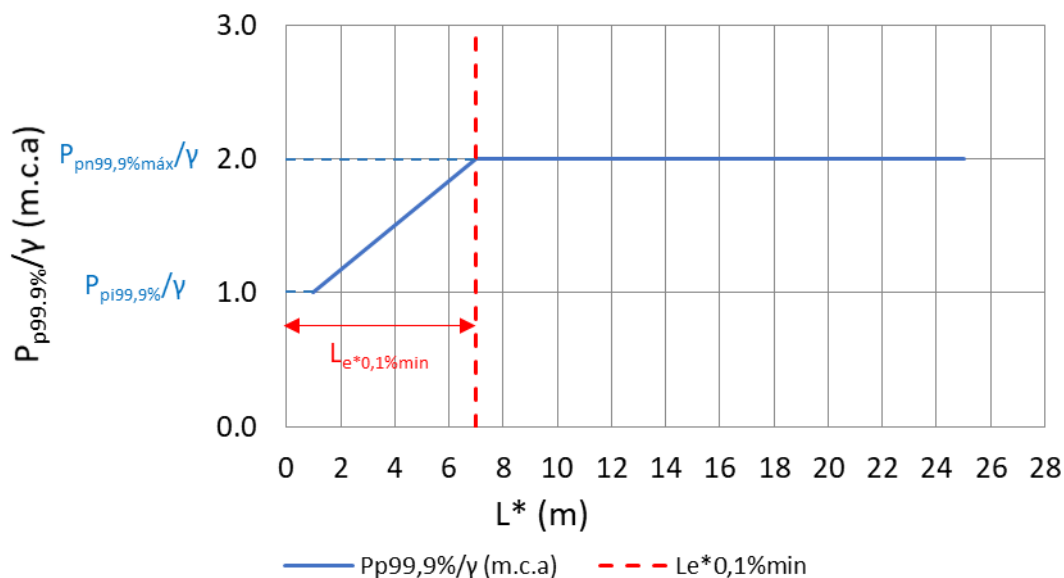


Figura 99: Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões máximas extremas ($P_{p99,9\%/\gamma}$) em função do comprimento da calha a partir do início dos degraus (L^*).

5.2.4.2.1 Posição inicial de pressão máxima definida pelas coordenadas (0; $P_{pi99,9\%/\gamma}$)

Analisando-se os modelos LOH I, LOH II e LAHE foi possível determinar as pressões que ocorrem nos patamares no início dos degraus ($P_{pi99,9\%/\gamma}$). No anexo G apresentam-se os valores destas pressões nos três modelos. De posse destes dados se fez uma adimensionalização das pressões extremas máximas que ocorrem no patamar no início da calha em degraus, considerando-se as características geométricas das estruturas e as características hidráulicas do escoamento. A Figura 100 apresenta a tendência dos valores de ($P_{pi99,9\%/\gamma}$) em função do número de Froude rugoso (F^*).

A tendência da Figura 100 pode ser representada pela Equação 43 abaixo:

$$\frac{\left(\frac{P_{ip99,9\%}}{\gamma}\right) h_d}{Z_i h_c} = 0,1164 - \frac{1,8896}{F^*} \quad \text{Equação 43}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,69$

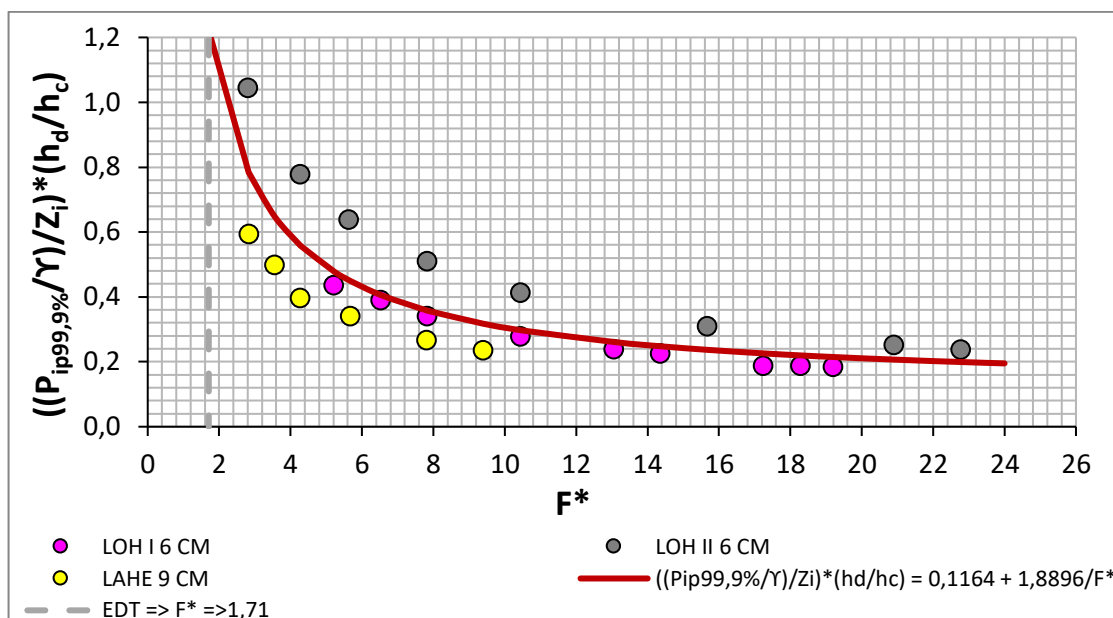


Figura 100 - Adimensionalização das pressões extremas máximas no patamar no início dos degraus (0; $P_{ip99,9\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro para os dados dos três modelos.

A Figura 101 apresenta a adimensionalização das pressões extremas máximas que ocorrem no patamar no início dos degraus em função do número de Froude rugoso com a inclusão de dados dos demais autores. Pode se observar que a dispersão aumenta em relação aos três modelos do presente trabalho. Entretanto, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados. A equação obtida com os dados dos outros autores está apresentada abaixo:

$$\frac{\left(\frac{P_{ip99,9\%}}{\gamma}\right) h_d}{Z_i h_c} = 0,1257 + \frac{1,4878}{F^*} \quad \text{Equação 44}$$

Para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,71$

- Válida para declividade 1:0,75 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,7$
- Válida para declividade 1:0,80 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,65$
- Válida para declividade 1:1,00 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,50$

A diferença entre a equação de previsão a partir dos dados dos 3 modelos em relação ao valor obtido com os demais autores:

- Para $F^* = 1,71 \Rightarrow (P_{pi99,9\%}/\gamma)_{3 \text{ modelos}} / (P_{pi99,9\%}/\gamma)_{\text{outros}} \approx 1,41$
- Para $F^* = 10 \Rightarrow (P_{pi99,9\%}/\gamma)_{3 \text{ modelos}} / (P_{pi99,9\%}/\gamma)_{\text{outros}} \approx 1,0$

- Para $F^* = 24 \Rightarrow (P_{pi99,9\%}/\gamma) 3 \text{ modelos} / (P_{pi99,9\%}/\gamma) \text{ outros} \approx 1,33$

Como explicado anteriormente esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório.

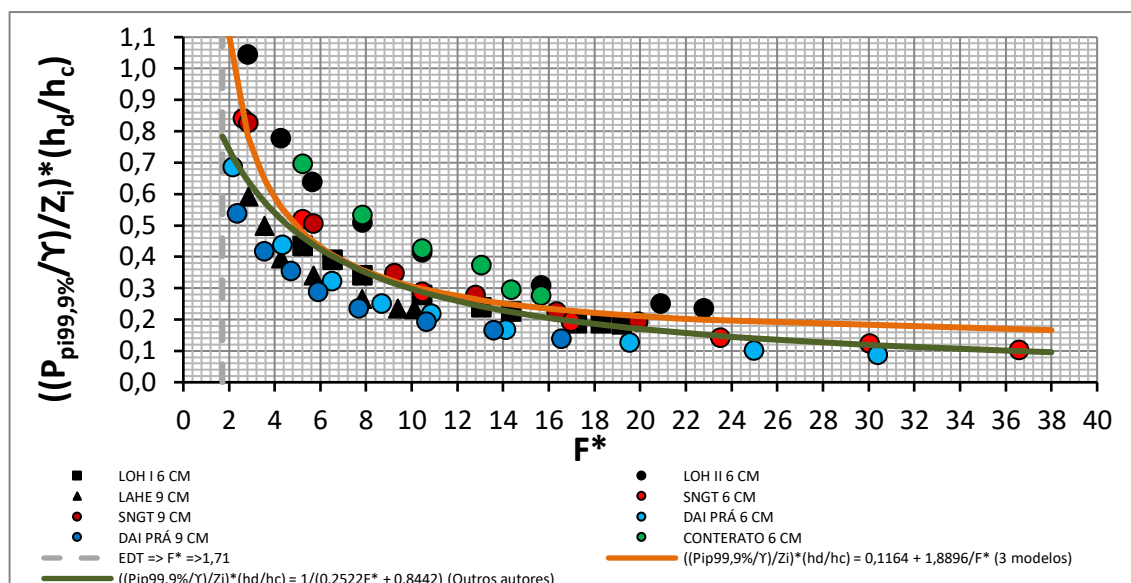


Figura 101 - Adimensionalização das pressões extremas máximas no patamar e início dos degraus ($0; P_{ip99,9\%}/\gamma$) em função do número de Froude rugoso do vertedouro com a inclusão de dados de outros autores.

5.2.4.2.2 Posição da maior pressão extrema máxima ($L^*_{e0,1\%min}$; $P_{pn99,9\%max}/\gamma$)

Usando-se a mesma metodologia de análise anterior, pode-se estimar as coordenadas do ponto de maior pressão extrema máxima no patamar ($L^*_{e0,1\%min}$; $P_{pn99,9\%max}/\gamma$). A posição onde ocorre esta pressão, coincide com a posição ($L^*_{e0,1\%min}$) onde ocorre a menor pressão extrema mínima no espelho ($P_{e0,1\%min}$).

A adimensionalização das maiores pressões extremas máximas no patamar ($P_{pn99,9\%max}/\gamma$) está apresentada na Figura 102. A equação que pode representar esta tendência está apresentada abaixo.

$$\frac{\left(\frac{P_{pn99,9\%max}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 1,0955 F^{*-0,66250} \quad \text{Equação 45}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24 \Rightarrow R^2 = 0,94$

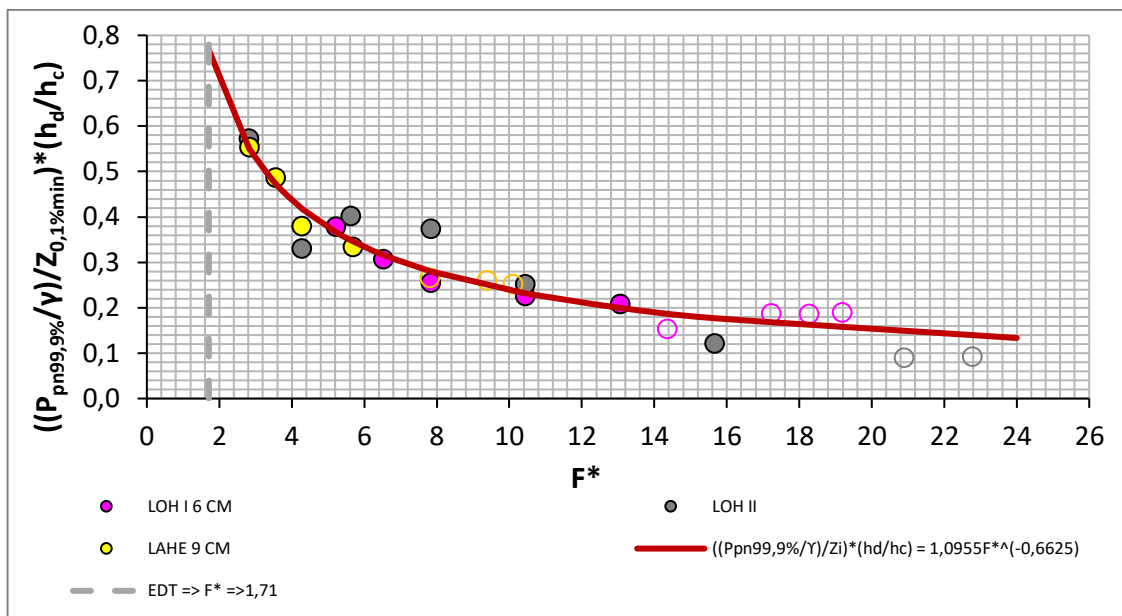


Figura 102 - Adimensionalização dos valores das maiores pressões extremas máximas no patamar pela carga a montante ($Z_{0,1\%min}$), altura do degrau (h_d) e altura crítica (h_c) $\frac{(P_{pn99,9\%max})}{\gamma} \frac{h_d}{h_c}$ em função do número de Froude rugoso do vertedouro.

A Figura 103 apresenta a inclusão dos dados de outros autores. Pode-se observar que a dispersão aumenta em relação aos três modelos do presente trabalho. Entretanto, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados. A equação obtida com os dados dos outros autores está apresentada abaixo:

$$\frac{\left(\frac{P_{pn99,9\%max}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,5641 F^{*-0,3875} \quad \text{Equação 46}$$

Válida para $1,71 < F^* \leq 24$ $R^2 = 0,94$

- Válida para declividade 1:0,75 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,7$
- Válida para declividade 1:0,80 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,65$
- Válida para declividade 1:1,00 e EDT $\Rightarrow F^* \geq \approx 1,50$

A diferença entre a equação de previsão a partir dos dados dos três modelos em relação ao valor obtido para demais autores:

- Para $F^* = 1,71 \Rightarrow (P_{p99,9\%max}/\gamma)$ 3 modelos/ $(P_{p99,9\%max}/\gamma)$ outros $\approx 1,67$
- Para $F^* = 11,0 \Rightarrow (P_{p99,9\%max}/\gamma)$ 3 modelos/ $(P_{p99,9\%max}/\gamma)$ outros $\approx 1,00$
- Para $F^* = 24 \Rightarrow (P_{p99,9\%max}/\gamma)$ 3 modelos/ $(P_{p99,9\%max}/\gamma)$ outros $\approx 0,81$

Como explicado anteriormente esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório.

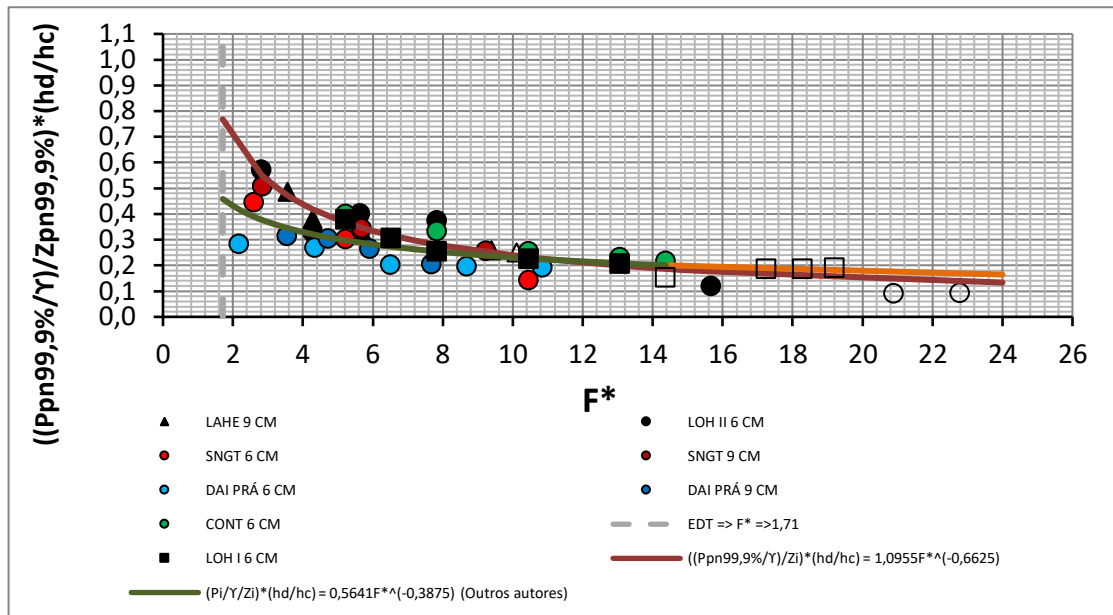


Figura 103 - Adimensionalização dos valores das maiores pressões extremas máximas no patamar pela carga a montante ($Z_{pn99,9\%}$), altura do degrau (h_d) e altura crítica (h_c) em função do número de Froude rugoso do vertedouro para outros autores.

6 DEFINIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MACROTUBULENTAS DO ESCOAMENTO

Com base na análise feita no capítulo anterior é possível definir as características macrotubulentas do escoamento a partir da distribuição longitudinal das pressões nas proximidades das quinas dos degraus e analisar quais seriam as condições críticas em um projeto de um vertedouro em degrau.

No item anterior se observou que (Figura 104):

- As menores pressões extremas mínimas acontecem no espelho.
- As pressões extremas mínimas no espelho podem ser representadas por 3 pontos:
 - * No início dos degraus ($0; P_{ei0,1\%}/\gamma$).
 - * No ponto de menor pressão ($L_{e^*0,1\%min}; P_{e0,1\%min}/\gamma$)
 - * No ponto de estabilização das pressões ($L_{en^*0,1\%min}; P_{en0,1\%}/\gamma$)
- As pressões extremas máximas no patamar podem ser representadas por 2 pontos notáveis:
 - * No início dos degraus ($0; P_{pi99,9\%}/\gamma$)
 - * No ponto de estabilização das pressões ($L_{e^*0,1\%min}; P_{pn99,9\%}/\gamma$)

A posição de início de aeração visual (L_v^*) ocorre após a ocorrência da menor pressão no espelho ($L_{e^*0,1\%min}$).

A concentração de ar (não medida neste trabalho), utilizando as equações de MATOS (1999) estabiliza em torno da posição $L_{e^*0,1\%min}$.

A Tabela 12 apresenta as equações para determinação destes pontos, dos respectivos valores de pressão e da concentração de ar.

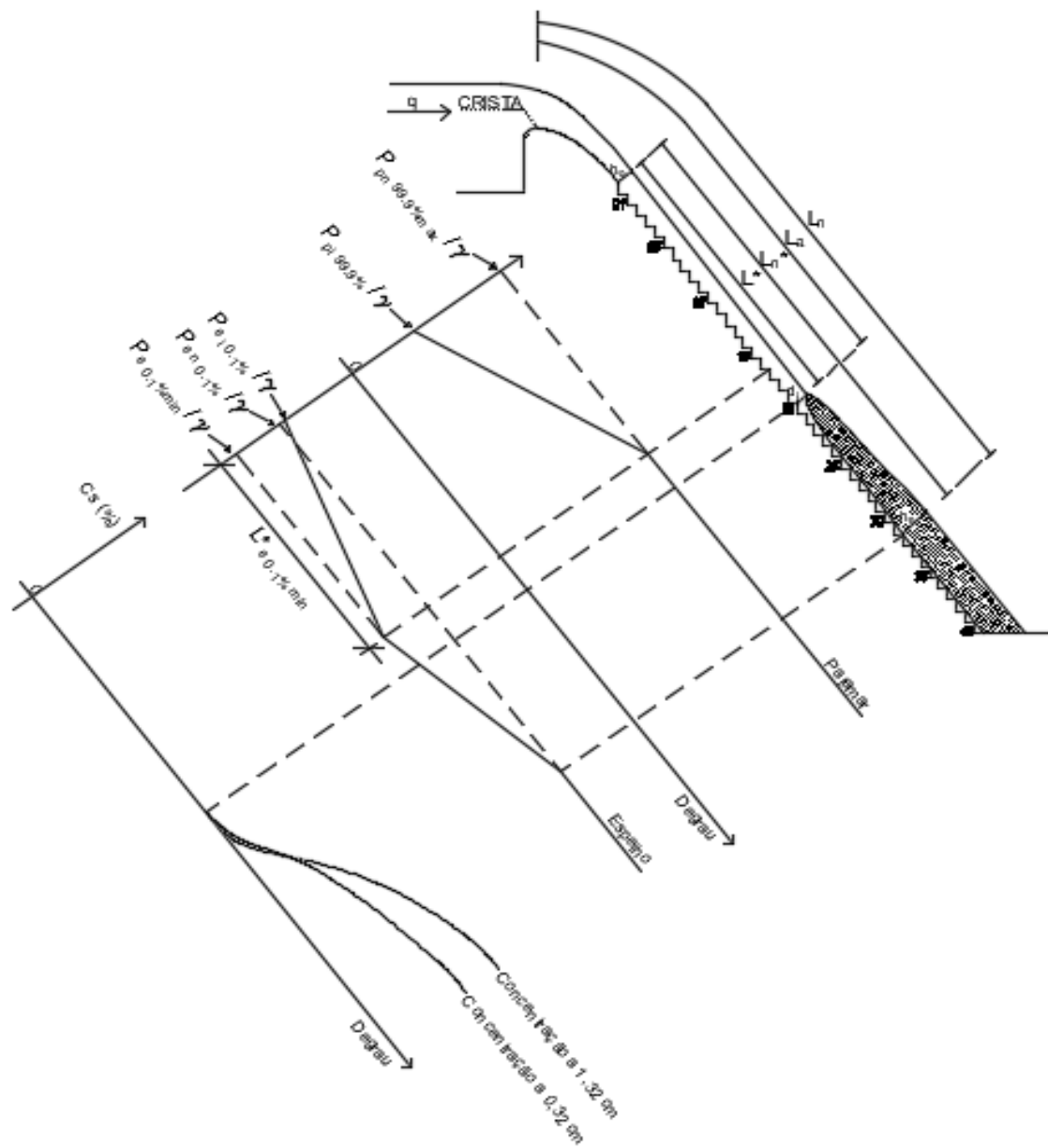


Figura 104 – Parâmetros da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas e máximas nos espelhos e patamares e da concentração de ar junto ao fundo e média no escoamento.

Tabela 12 - Determinação dos pontos característicos do escoamento em um vertedouro em degrau

Característica		Espelho	Patamar
Início dos degraus	Posição	0	0
	Pressão extrema	$\frac{\left(\frac{P_{ie0,1\%}}{\gamma}\right) h_d}{z_i h_c} = -0,0437 - \frac{1,3426}{F^*}$	$\frac{\left(\frac{P_{ip99,9\%}}{\gamma}\right) h_d}{z_i h_c} = 0,1164 - \frac{1,8896}{F^*}$
Menor pressão extrema mínima	Posição	$\frac{L_{e0,1\%min}^*}{k} = 2,3523F^* - 1,6623$	-
	Menor Pressão extrema	$\frac{\left(\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(F^*) - 0,5664$	-
Estabilização das pressões**	Posição	$\frac{L_{e_n}^*}{k} = 4,0231 F^* + 0,9448$	$Lp_n^* = L_{e0,1\%min}^*$
	Pressão extrema	$\frac{P_{en0,17\%}}{\gamma h_c} = -1,63$	$\frac{\left(\frac{P_{pn99,9\%max}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 1,0955 F^{*-0,6625}$
Início da aeração visual	Posição	$\frac{L_v^*}{k} = 2,8037 F^* - 1,1378$	
Concentração de ar junto ao fundo	A 0,32 cm do fundo*	$C_s = \frac{0,324}{\left(1 + \frac{s'}{10,195}\right)^{-1,232}}$	
	A 1,32 cm do fundo*	$C_s = \frac{0,424}{\left(1 + \frac{s'}{9,514}\right)^{-1,798}}$	

* Calculada pela equação de MATOS (1999)

** A pressão de estabilização das pressões extremas máxima é a maior das pressões máximas.

7 APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PREVISÃO DAS PRESSÕES EM UM ESTUDO DE CASO

Como já mencionado anteriormente, o presente trabalho está inserido no projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Pré-Aeração” apresentado por Furnas Centrais Elétricas à Agência Nacional de Energia (ANEEL). O objetivo do projeto de P&D é desenvolver metodologia a partir da utilização de modelagem física para caracterizar o efeito da pré-aeração em relação à aeração natural do escoamento em vertedouros em degraus, visando contribuir para critérios de dimensionamento com o objetivo de aumentar a faixa de operação dos vertedouros. Esta tese analisou as pressões extremas mínimas e máximas para a situação com aeração natural, importante para que se possa comparar e verificar a influência de diferentes formas de aeração. Neste trabalho foi proposta uma metodologia para definir os locais onde acontecem as pressões extremas, os valores das mesmas e as vazões associadas. Estas definições são importantes para o dimensionamento de calhas de vertedouros em degraus para que se determinem as vazões máximas que devem escoar pela estrutura, as pressões associadas e os locais onde é possível que aconteçam danos. Com estas informações é possível que se direcione adequadamente o cálculo estrutural e a definição dos materiais a serem utilizados.

A seguir é apresentada uma aplicação do método desenvolvido nesta tese para a previsão das pressões extremas mínimas e máximas atuantes no espelho e no patamar de um vertedouro em degraus com escoamento deslizante sobre turbilhões com aeração natural. A Figura 105 e a Tabela 13 apresentam as características geométricas do estudo de caso baseado em um caso real. A análise foi desenvolvida buscando a determinação da vazão máxima e do degrau onde pode haver risco potencial de dano na calha do vertedouro devido às pressões extremas.

Não foi considerando que a intensidade dos danos:

- Depende da característica do concreto de revestimento dos degraus (patamar e espelho);
- Depende da duração do escoamento neste tipo de condição.

Outro aspecto a ser considerado é que após ocorrer um dano na superfície de concreto, por menor que seja este passa a ser um gerador de novos danos por aumentar a rugosidade da superfície. Este dano pode gerar outros pontos de baixas pressões, aumentando as chances da ocorrência de novas erosões.

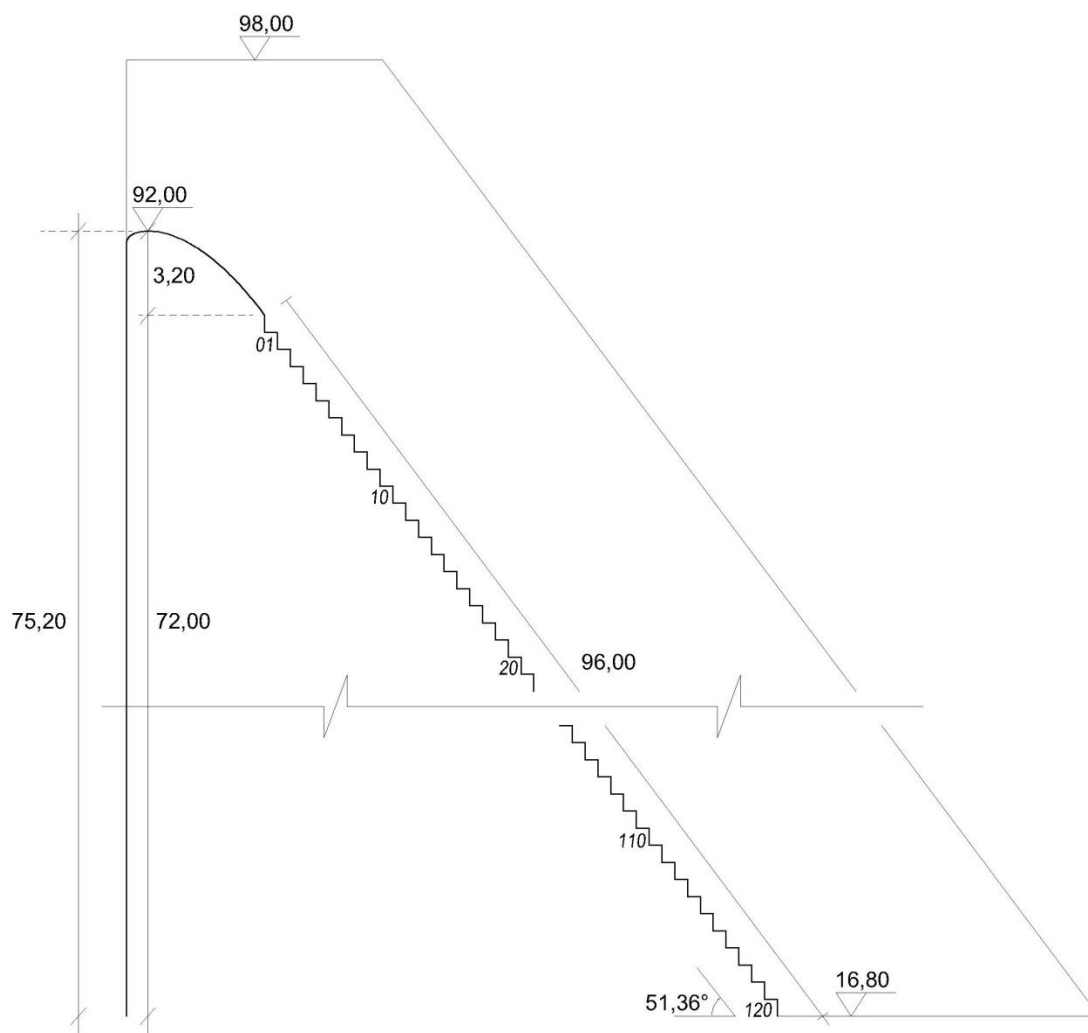


Figura 105 - Características geométricas do vertedouro em degraus onde foram aplicadas as equações de previsão das pressões extremas.

Tabela 13- Características geométricas do vertedouro em degraus onde foram aplicadas as equações de previsão das pressões extremas

Características da Estrutura	Unidade	Símbolo	Medida
Cota da crista do vertedouro	m	CCV	92,00
Cota de coroamento da Barragem	m	CCB	98,00
Cota do terreno a jusante	m	CTj	16,80
Número de degraus total	m	N _{dt}	120

Altura total do vertedouro	m	Z_v+y_j	75,20
Altura da crista da ogiva a jusante até o início do degrau	m	y_j	3,20
Altura total dos degraus	m	Z_v	72,00
Comprimento total da calha	m	L^*_{total}	96,00
Declividade da calha		m	0,75
Ângulo		rad	0,927
Altura do degrau	m	h_d	0,60
Rugosidade do degrau		k	0,36
Diagonal do degrau	m	l_d	0,75
Largura do vertedouro		L_B	330,00
Vazão específica analisada (a)	$m^3/s/m$	q_a	30
Vazão específica analisada (b)	$m^3/s/m$	q_b	25
Vazão específica analisada (c)	$m^3/s/m$	q_c	20
Vazão específica analisada (d)	$m^3/s/m$	q_d	15
Vazão específica analisada (e)	$m^3/s/m$	q_e	10
Vazão específica analisada (f)	$m^3/s/m$	q_f	5

7.1 Estimativas das pressões mínimas extremas junto aos espelhos ($P_{e0,1\%/ \gamma}$) e suas localizações.

A partir da aplicação das equações apresentadas na Tabela 12 e das informações apresentadas na Figura 105 e na Tabela 13 foi possível estimar as pressões mínimas extremas junto aos espelhos ($P_{e0,1\%/ \gamma}$) e suas localizações.

Para efetuar a análise do risco potencial de dano sobre a calha o vertedouro foi dividido em regiões:

- Região sem risco potencial de dano:

* Quando a pressão extrema mínima ($P_{e0,1\%/ \gamma}$) junto à quina do espelho é superior a - 10,2 m.c.a ou a concentração de ar junto ao fundo é superior a 8% conforme recomendação de Peterka (1957).

- Região com risco de cavitação

* Quando a pressão extrema mínima ($P_{e0,1\%/ \gamma}$) junto à quina do espelho é inferior a -10,2 m.c.a. e a concentração de ar junto ao fundo é inferior a 8%.

A Tabela 14 apresenta um resumo da extensão do risco potencial nas condições dos escoamentos representados nos gráficos das Figura 106, Figura 107, Figura 108, Figura 109, Figura 110 , Figura 111 e Figura 112.

Tabela 14- Extensão do risco potencial de danos nos degraus

Região		Sem risco de danos $P_{0,1\%}/\gamma \geq -10,2$ m.c.a	Risco de cavitação $P_{0,1\%}/\gamma \leq -10$ m.c.a				Sem risco de danos $P_{0,1\%}/\gamma \geq -10$ m.c.a ou $C_s \geq 8\%$	
q m ³ /s/m	F*	Degraus		Degraus		Nº de degraus	Degraus	
		Início	Fim	Início	Fim		Início	Fim
5	8.7	0	120	-	-	-	-	-
10	16.5	0	120	-	-	-	-	-
15	24.8	0	120	-	-	-	-	-
20	33.1	0	120	-	-	-	-	-
22	36.3	0	38	39	40	2	43	120
25	41.3	0	29	30	59	29	60	120
30	49.6	0	22	23	71	48	71	120

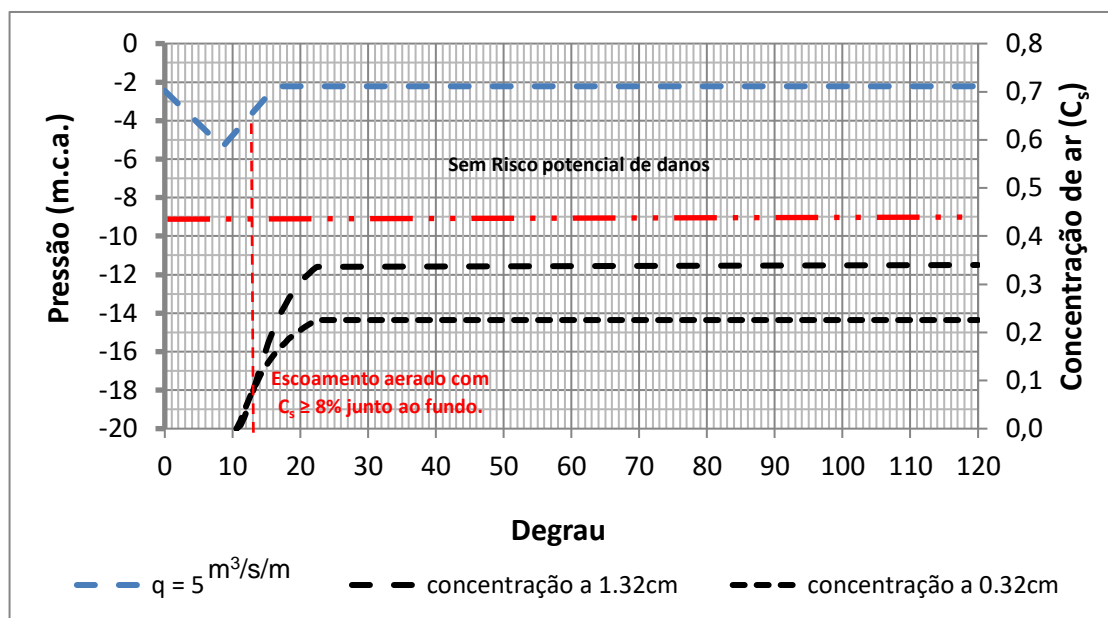


Figura 106 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de 5m³/s/m ($F^* = 8,7$) para um vertedouro com degraus de 0,60 m de altura.

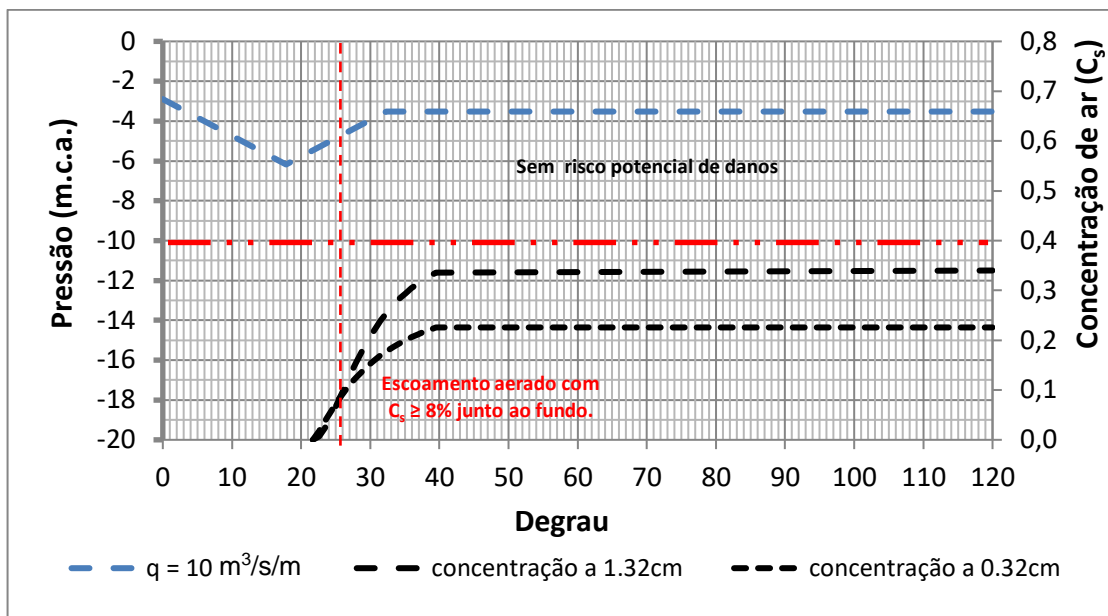


Figura 107 - Distribuição longitudinal das pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 16,5$) para um vertedouro com degraus de $0,60 \text{ m}$ de altura e declividade $1V:0,75H$.

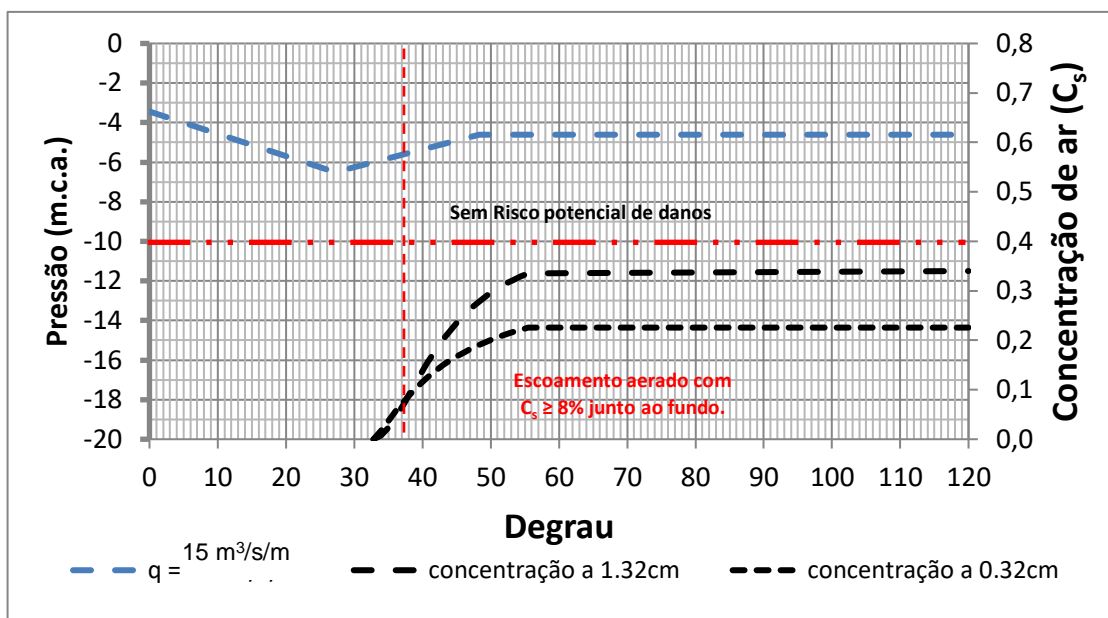


Figura 108 - Distribuição longitudinal das pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $15 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 33,1$) para um vertedouro com degraus de $0,60 \text{ m}$ de altura e declividade $1V:0,75H$.

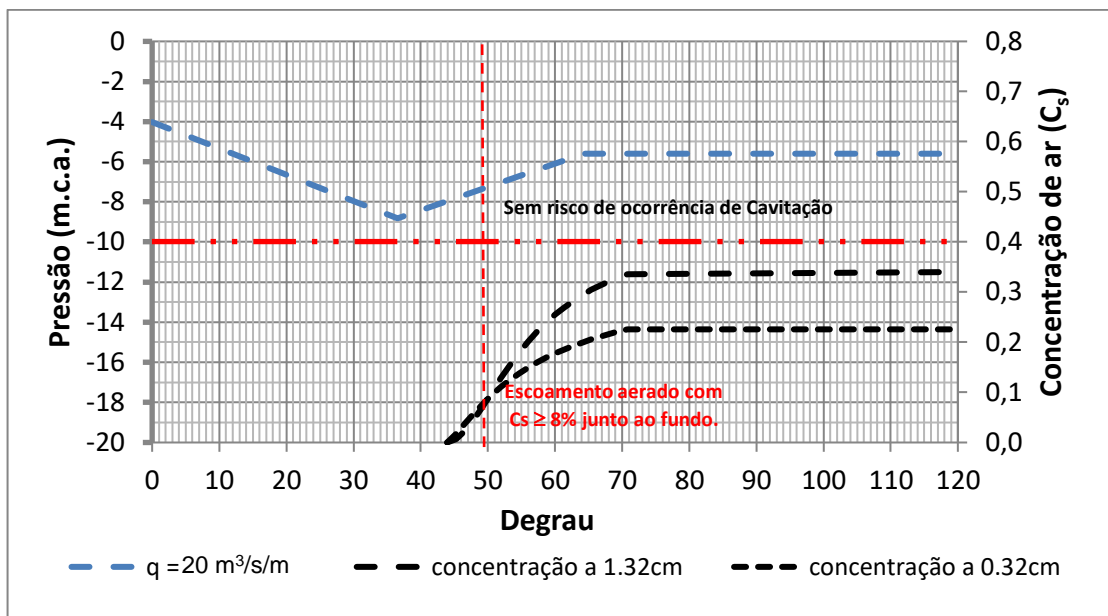


Figura 109 - Distribuição longitudinal das pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $20\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 24,8$) para um vertedouro com degraus de $0,60\text{m}$ de altura e declividade $1\text{V}:0,75\text{H}$.

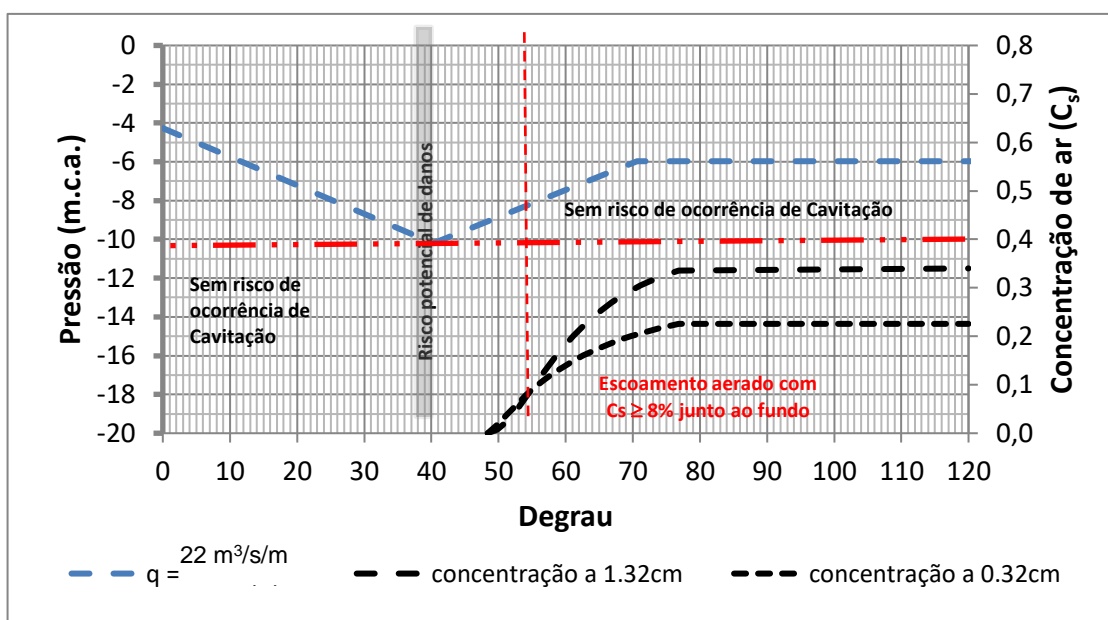


Figura 110 - Distribuição longitudinal das pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $22\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 24,8$) para um vertedouro com degraus de $0,60\text{m}$ de altura e declividade $1\text{V}:0,75\text{H}$.

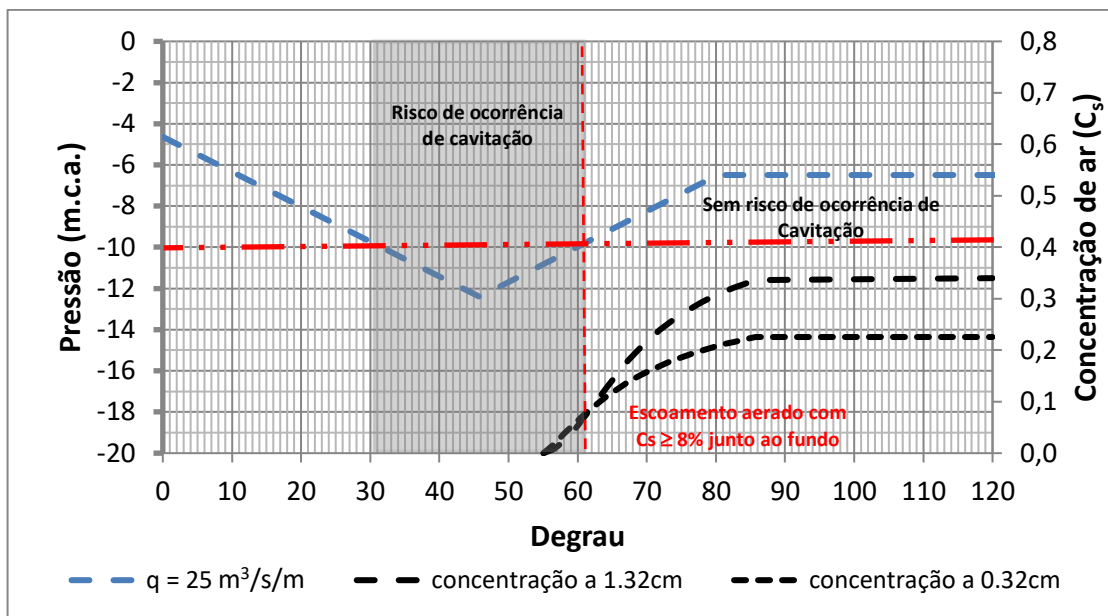


Figura 111 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $25\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 41,3$) para um vertedouro com degraus de $0,60\text{m}$ de altura e declividade $1\text{V}:0,75\text{H}$.

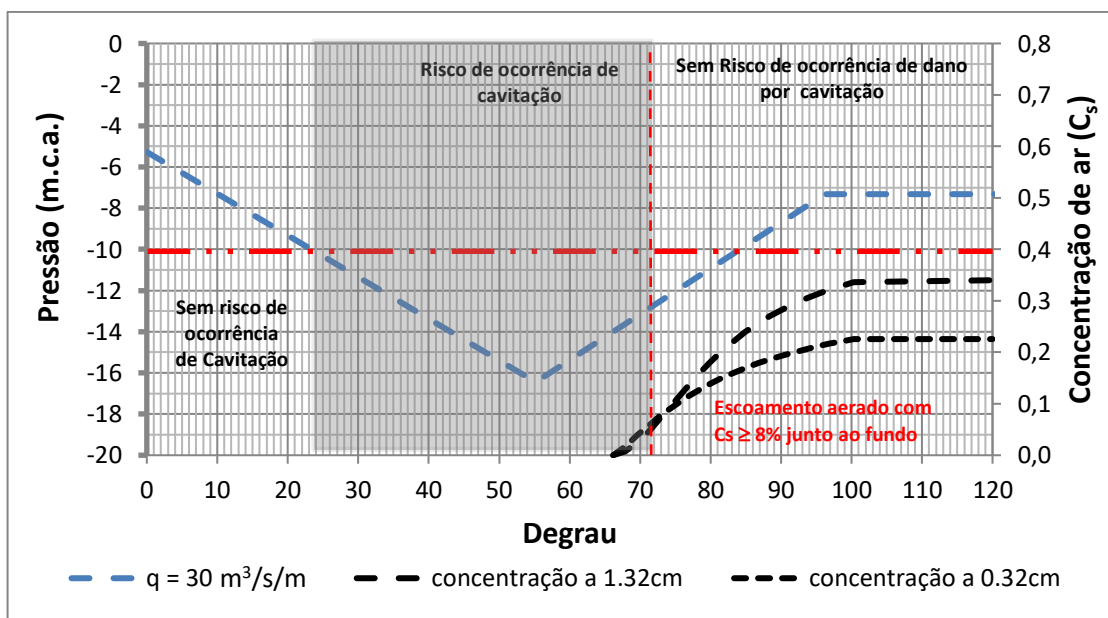


Figura 112 - Distribuição longitudinal da pressões mínimas extremas no espelho para a vazão de $30\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ($F^* = 49,6$) para um vertedouro com degraus de $0,60\text{m}$ de altura e e declividade $1\text{V}:0,75\text{H}$.

Analisando-se as Figura 106, Figura 107, Figura 108, Figura 109, Figura 110, Figura 111 e Figura 112 pode-se observar que:

- As vazões específicas que apresentam risco de cavitação ($(P_{e0,1\%}/\gamma) \leq -10,2$ m.c.a e $C_s < 8\%$) são:

$$* q \geq 22 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m} \rightarrow F^* \geq 24,8$$

- A extensão dos degraus com risco de dano potencial de cavitação aumenta com a vazão específica, conforme pode ser visto na Tabela 14 e Figura 113.

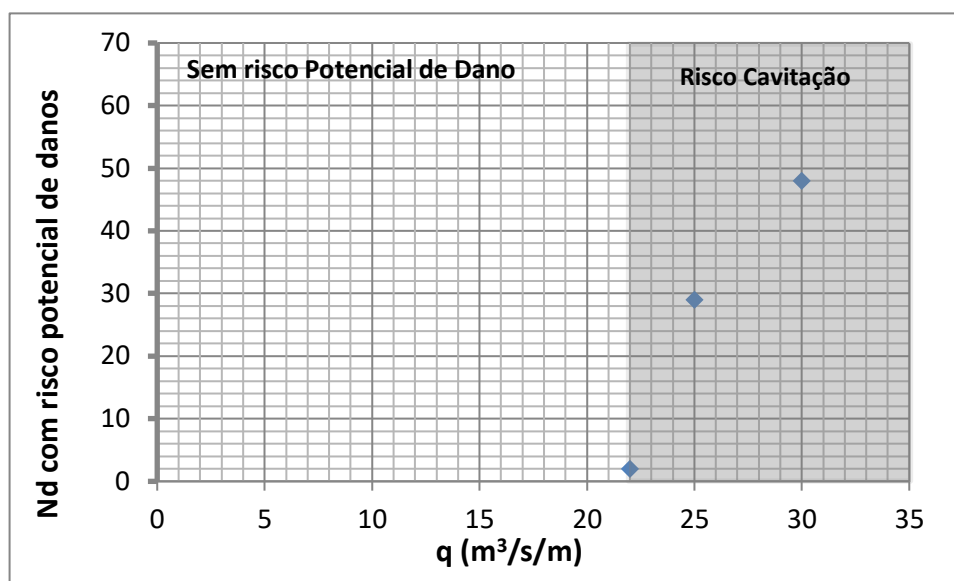


Figura 113 - Extensão em número de degraus com risco potencial de danos em função da vazão específica vertida

- Através da análise das Tabela 15 e Tabela 16:

* em relação às posições dos pontos característicos :ponto de início do escoamento uniforme das pressões extremas mínimas L_{en}^* , ponto de menor pressão extrema mínima $L_{e0,1\%min}^*$ e ponto visual de início da aeração L_v^* ;

$$\frac{L_{en}^*}{L_{e0,1\%min}^*} \approx 1,80$$

$$\frac{L_{en}^*}{L_v^*} \approx 1,45$$

$$\frac{L_v^*}{L_{e0,1\%min}^*} \approx 1,20$$

* em relação às pressões nos pontos característicos:pressão extrema mínima, pressão extrema mínima estabilizada – $P_{e0,1\%min}$ e $P_{en0,1\%}$.

$$\frac{P_{e0,1\%min}}{\gamma * Z_{0,1\%min}} \approx - 0,35$$

$$\frac{P_{en0,1\%}}{\gamma * Z_n} \approx - 0,15$$

* em relação à carga de montante (os valores servem somente como referência):

$$\frac{Z_{e0,1\%min}^*}{Z_n} \approx 1,25$$

Tabela 15– Características dos pontos de interesse (pressão, carga a montante e Posição).

q	F*	Menor pressão			Pressão constante			Posição de início de aeração a partir do 1º degrau
		$P_{e0,1\%min}/\gamma$	$Z_{0,1\%min}$	$L_{e0,1\%min}^*$	$P_{en0,1\%}/\gamma$	Z_n	L_{en}^*	L_v^*
m³/s/m	-	m.c.a.	m	m	m.c.a.	m	m	m
5	8,263	-5,367	10,361	6,399	-2,219	13,046	12,308	7,932
10	16,526	-6,18	17,158	13,396	-3,522	19,42	24,275	16,272
15	24,789	-6,504	23,762	20,394	-4,616	28,994	36,242	24,612
20	33,052	-8,822	30,258	27,391	-5,591	38,568	48,21	32,952
22	36,357	-10,2	32,835	30,19	-5,958	42,397	52,997	36,288
25	41,315	-12,411**	36,681	34,388	-6,488	48,142	60,177	41,292
30	16,526	-16,448**	43,051	41,386	-7,327	57,716	72,145	49,632

** O valor serve somente como referência.

Tabela 16- Relações entre as pressões, posições e carga a montante.

q	F*	$(P_{e0,1\%min}/\gamma)/Z_{0,1\%min}$	$(P_{n0,1\%}/\gamma)/Z_n$	$L_{en}^*/L_{e0,1\%min}^*$	L_{en}^*/L_v^*	$L_v^*/L_{e0,1\%min}^*$	$Z_{0,1\%min}/Z_n$	$L_{en}^*/L_{e0,1\%min}^*$
m³/s/m	-	-	-	-	-	-	-	-
5	8,263	-0.52	-0.17	1.92	1.55	1.24	1.26	1.92
10	16,526	-0.36	-0.18	1.81	1.49	1.22	1.13	1.81
15	24,789	-0.27	-0.16	1.78	1.47	1.21	1.22	1.78
20	33,052	-0.29	-0.15	1.76	1.46	1.20	1.28	1,76
22	36,357	-0.31	-0.14	1.76	1.46	1.20	1.29	1,76
25	41,315	-0.34	-0.14	1.75	1.46	1.20	1.31	1,75
30	16,526	-0.38	-0.13	1.74	1.45	1.20	1.34	1,74
Média	-	-0.35	-0.15	1.79	1.48	1.21	1.26	1,79

- Analisando os resultados da Tabela 15 observa-se que:

* A vazão de $22 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ apresenta pressões mínimas extremas da ordem de $-10,2 \text{ m.c.a.}$ Este valor está próximo dos sugeridos por MATOS et al. (2001), BOES e HAGER (2003) e OSMAR (2016) como valores para risco de danos por cavitação no vertedouro em degrau.

7.2 Estimativas das pressões máximas extremas junto aos patamares ($P_{p99,9\%}/\gamma$) e suas localizações.

A Figura 114 apresenta a aplicação das equações para o cálculo da estimativa de pressões extremas máximas ($P_{p99,9\%}/\gamma$) junto às quinas dos patamares dos degraus. A Tabela 17 apresenta os valores das pressões máximas onde se pode observar que no ponto de aeração esta pressão é equivalente a 0,62 da carga a montante (Z_{\min}). A autora considera importante a observação de que no ponto de aeração 62% da carga de montante foi transformada em pressão estabilizada. A partir desta posição o valor da pressão terá pouca variação.

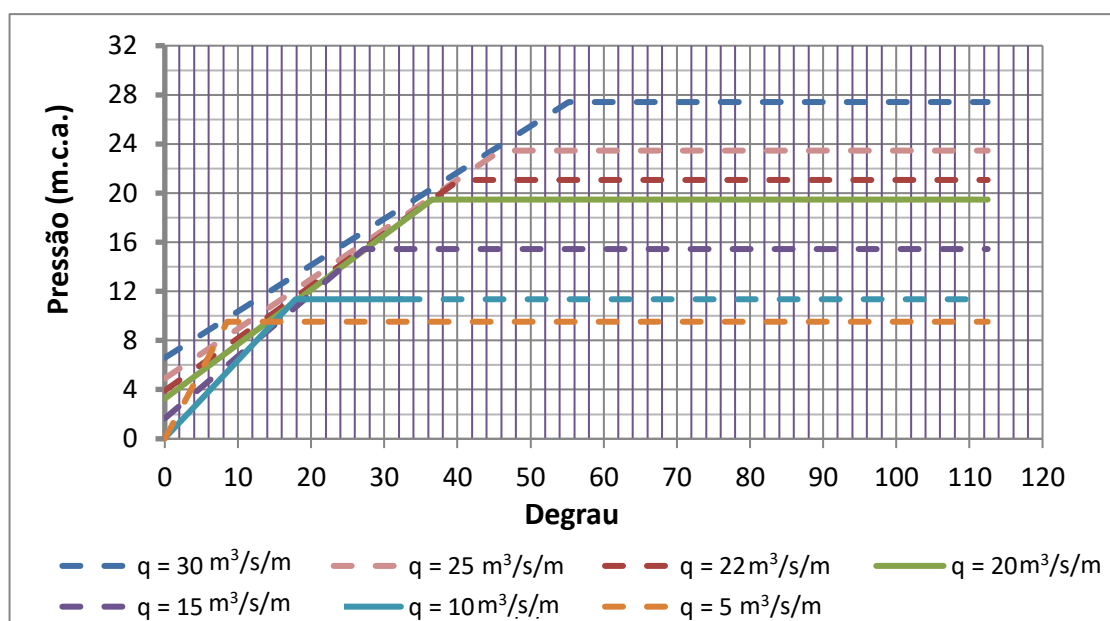


Figura 114 - Distribuição longitudinal da pressões máximas extremas no patamar para as vazões calculadas para um vertedouro com degraus de $0,60 \text{ m}$ de altura.

Tabela 17 Relação entre a pressão máxima no patamar e a carga a montante em relação à posição de início de aeração no espelho.

q	F*	$P_{p99,9\%}/\gamma$	Z_{min}	$(P_{p99,9\%}/\gamma)/Z_{min}$
30	49.6	27.41	44.35	0.62
25	41.3	23.46	37.98	0.62
22	36.4	21.07	34.13	0.62
20	33.1	19.47	31.56	0.62
15	24.8	15.45	25.06	0.62
10	16.5	11.36	18.46	0.62
5	8.3	7.15	11.66	0.61
			Média	0,62

8 CONCLUSÃO FINAL

A avaliação do escoamento sobre vertedouros em degraus na sua condição com aeração natural (incorporação de ar a partir do afloramento da camada limite induzida pela rugosidade da calha) foi conduzida considerando-se estudos experimentais desenvolvidos em três modelos (LOH I, LOH II e LAHE) sobre os quais foram avaliadas a posição de início de aeração (L^*), as pressões extremas mínimas nas proximidades das quinas dos espelhos ($P_{e0,1\%}/\gamma$), as pressões extremas máximas nas proximidades das quinas dos patamares ($P_{p99,9\%}/\gamma$) e suas posições ($L^*_{e0,1\%min}$).

Pelo que foi exposto nos capítulos anteriores pode-se observar que:

- A análise das pressões extremas máximas e mínimas no patamar e no espelho apresentou coerência entre os três modelos.
- A definição da posição de início de aeração por critério visual considerando o comprimento do perfil da ogiva ($L_a/k = f(F^*)$) apresentou uma boa representatividade para os três modelos e também quando comparada com resultados de outros autores. Entretanto, observou-se que o comprimento da ogiva poderia interferir na determinação mais precisa do ponto de início da aeração. Com a finalidade de reduzir esta interferência, se observou que a medição do ponto de início da aeração a partir do início dos degraus da calha (L^*) resultou em uma relação adimensional linear, que apresentou uma boa aderência com os dados de outros autores.
- As pressões extremas mínimas junto às quinas dos espelhos permitem determinar três pontos característicos do escoamento;
- As pressões extremas mínimas ocorrem nos espelhos, enquanto as pressões extremas máximas ocorrem nos patamares.
- O espelho apresenta pressões mínimas extremas ($P_{e0,1\%}/\gamma$) mais críticas do que as do patamar ($P_{p0,1\%}/\gamma$).
- O patamar apresenta pressões extremas máximas ($P_{p99,9\%}/\gamma$) mais críticas do que as do espelho ($P_{e99,9\%}/\gamma$).
- A análise através dos coeficientes de pressão ($C_{p0,1\%}$ ou $C_{p99,9\%} = f(s')$), permite ver a tendência do comportamento da distribuição de pressão ao longo da calha, mas não permite ver a influência da vazão específica nas pressões extremas. Os valores apresentaram uma grande dispersão entre os

três modelos estudados, o mesmo ocorrendo com os dados dos demais autores.

- A utilização de adimensionais ($\zeta_{P_{0,1\%}} = P_{0,1\%}/\gamma/h_c$ ou $\zeta_{P_{99,9\%}} = P_{99,9\%}/\gamma/h_c = f(s')$) apresentou dispersão menor entre os três modelos do que os adimensionais ($C_{p0,1\%}, C_{p99,9\%} = f(s')$). Entretanto, quando se compara com resultado de outros autores a dispersão aumenta.
- A posição no espelho onde ocorrem as pressões mínimas medidas a partir do início dos degraus ($L^*_{e0,1\%min}$) situa-se a montante do início da aeração visual (L^*_v). De uma maneira aproximada se dá pela seguinte relação: $(L^*_{e0,1\%min}/k)/(L^*_v/k) \approx 1,2$.
- A posição no espelho onde as pressões mínimas (L^*_{en}) passam a oscilar em torno de um valor (zona de aeração total) pode ser estimada pelas equações apresentadas neste trabalho, ou, de maneira aproximada, pelas relações:
 - * $(L^*_{ev}/k)/(L^*_{0,1\%min}/k) \approx 1,20$
 - * $(L^*_{en}/k)/(L^*_{0,1\%min}/k) \approx 1,75$
 - * $(L^*_{en}/k)/(L^*_v/k) \approx 1,45$
- Pela análise dos dados brutos foi possível verificar que o comportamento das pressões extremas mínimas no espelho pode ser representado por três pontos característicos (nos quais podem ser estimadas as pressões extremas mínimas através de adimensionais):
 - * Ponto de início da influência do degrau ($0; P_{ei0,1\%}/\gamma$).
 - * Ponto de mínima pressão ($L^*_{e0,1\%min}; P_{e0,1\%min}/\gamma$), próximo ao ponto de início de aeração.
 - * Ponto de pressão uniforme ($L^*_{en}; P_{en0,1\%}/\gamma$), onde ocorre a aeração total do escoamento.
- Pela análise dos dados brutos foi possível verificar que o comportamento das pressões extremas máximas no patamar pode ser representado por dois pontos característicos onde podem ser estimadas as pressões extremas máximas:
 - * Ponto de início da influência do degrau ($0; P_{pi99,9\%}/\gamma$);
 - * Ponto de máxima pressão ($L^*_{e0,1\%min}; P_{pn99,9\%}/\gamma$), próximo ao ponto de início de aeração;

- Através de um estudo de caso de um vertedouro em degrau com declividade 1V: 0,75H e altura do degrau de 0,60 m foi possível determinar o trecho da calha do vertedouro em degraus que apresentaria risco potencial de dano em função da vazão específica:
 * risco de cavitação ($P_{e0,1\%/\gamma} \approx -10,2 \text{ m.c.a.} \Rightarrow q \geq 22 \text{ m}^3/\text{s/m}^2$ ‘
 Esse valor de vazão específica está coerente com os valores encontrados por diferentes autores: MATOS et al (2001), BOES e HAGER (2003) e OSMAR (2016).
- A aplicação desta proposta de abordagem para análise das pressões extremas permite identificar a extensão da calha que pode estar sujeita a risco de dano por cavitação.
- A autora entende que estas definições são de interesse para fins de projeto, de programação de inspeções e de manutenção da calha do vertedouro.

Portanto em relação aos objetivos principais desta tese, mencionados no item 2.2.1, se observa que foram atendidos como relacionado abaixo:

- Com relação a desenvolver processos e metodologias de análise dos dados experimentais de pressão extrema ao longo da calha do vertedouro em degraus, no capítulo 5 deste trabalho encontra-se detalhada a metodologia desenvolvida a partir dos dados obtidos nos três modelos hidráulicos reduzidos usados na pesquisa na qual este trabalho se baseou.
- O objetivo estabelecido de contribuir para o estabelecimento de critérios para o dimensionamento dessas estruturas, no capítulo 6 foram definidas as características macroturbulentas do escoamento a partir da distribuição longitudinal das pressões nas proximidades das quinas dos degraus e analisadas quais seriam as condições críticas em um projeto de um vertedouro em degraus. Equações para determinar os pontos característicos verificados como importantes com relação a pressões extremas atuantes no espelho e no patamar dos degraus, suas localizações, assim como previsão de concentração de ar junto ao fundo foram definidas e encontram-se listadas na tabela 12 visando orientar o dimensionamento da estrutura.

- A previsão do risco de erosão/cavitação pode ser realizada a partir da verificação das pressões extremas mínimas atuantes junto às quinas dos degraus (espelho e patamar) ao longo da calha a partir das equações de previsão apresentadas na tabela 12 e através da comparação dos valores definidos por diversos autores como sendo valores limites para a ocorrência do risco de cavitação.
- A estimativa das pressões atuantes junto às quinas dos degraus (espelho e patamar) ao longo da calha e a determinação da posição e o valor das pressões em função de vazões específicas foram definidas no capítulo 6 e tanto o cálculo das pressões extremas como sua posição foram analisadas e equações foram definidas para seu cálculo. O capítulo 7 mostra uma aplicação da metodologia proposta a um estudo de caso onde foram determinadas as pressões extremas, sua localização na calha e extensão do risco potencial de danos os degraus para 7 vazões diferentes. Com esta aplicação se entende que os objetivos principais propostos neste trabalho foram atendidos.

9 RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Este trabalho procurou sintetizar os estudos de pressões junto às quinas dos espelhos e patamares de vertedouros em degrau em condição de escoamento com aeração natural e propor uma nova abordagem para a estimativa das pressões extremas mínimas e máximas atuantes no espelho e no patamar. Apesar de se ter alcançado os objetivos propostos ainda ficaram muitos questionamentos para estudos futuros com o objetivo de se conhecer o escoamento e suas características macroturbulentas.

A autora sugere as seguintes linhas de pesquisa em continuação ao presente trabalho:

- Medição e análise da distribuição da concentração de ar (C_s) junto ao pseudo-fundo, de maneira a confirmar onde o escoamento passa a apresentar mais de 8% de concentração de ar.
- Medição e análise da distribuição das pressões junto às quinas dos degraus em um modelo com escala maior e com um número maior de degraus visando reduzir o efeito de escala nas medições simultâneas de:
 - * pressão,
 - * velocidade do escoamento;
 - * lâmina de água;
 - * concentração de ar
- Para uma melhor compreensão do escoamento, analisar como se processa a distribuição junto às quinas dos degraus (espelho e patamar) das seguintes grandezas:
 - * pressões médias (P_{med}/γ),
 - * flutuações de pressão (σ/γ);
 - * coeficientes de assimetria (A_d);
 - * coeficiente de Kurtose (k_u);
 - * frequências dominantes (f_d);
 - * resultantes nas quinas (R_d);
- Definir relações adimensionais para os pontos característicos do espelho e do patamar considerando as demais características estatísticas:
 - * pressões médias (P_{med}/γ),

- * flutuações de pressão (σ/γ);
- * coeficientes de assimetria (A_d);
- * coeficientes de Kurtose (k_u);
- * coeficientes estadísticos ($N_{x\%}$);
- * frequências dominantes (f_d);
- * resultantes nas quinas (R_d);
- * índice de cavitação (σ_c).

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMADOR, A - Comportamiento Hidráulico de los Aliaderos escalonados em presas de hormigón compactado. Tese de doutoramento. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2005.
2. AMADOR, A., SÁNCHEZ-JUNY, M. e DOLZ, J. Developing Flow Region and Pressure Fluctuations on Steeply Sloping Stepped Spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, Inglaterra, 2009.
3. AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. SÁNCHEZ-TEMBLEQUE, F. e PUERTAS, J. Estudo experimental no campo de pressões e de velocidades num descarregador de cheias em degraus. 7º Congresso de Água de Portugal. Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2004.
4. ANDRÉ, M. e MATOS, J. S. G. – Característica da onda estacionária oblíqua do escoamento deslizante sobre turbilhões em descarregadores de cheias em degraus com paredes convergentes. 7º Silusba. 2005.
5. ANDRÉ, S. - High velocity aerated flow on stepped chutes with macro-roughness elements. Tese de doutoramento. École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2004. Meio Magnético
6. ANDRIOLO, F. R. (2002) RCC Brazilian Practices. São Paulo: Oficina de textos, 95 p.
7. ARANTES, E. J. Caracterização do Escoamento sobre Vertedouros em Degraus Via CFD. 2007. PhD thesis, São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2007.
8. ARNDT, R. E. A. Cavitation in fluid machinery and hydraulic structures. *Ann. Rev. Fluid Mech.* volume 13, páginas 273-328, 1981.
9. BALL, J.W. Cavitation Characteristics of Gates Slots< *journal of the Hydraulics Division*, ,ASCE vol.85, No. HY10, pp. 81-114, October 1959.
10. BAUR, T. e KÖNGETER, J. - New aspects of research on the prediction of cavitation. *Proc. of the 4th International Conference on Hydropower Development*, Bergen, Editor Balkema, páginas 351-360, 2001.
11. BINDO, M. Gautier, J., Lacroix, F. The Stepped Spillwy of M´Bali dam. *Water Power & Dam Construction*, p. 35-36, January, 1993

12. BOES, R. M. (2000). Discussion of "Characteristics of skimming flow over stepped spillways" by M. R. Chamani and N. Rajaratnam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(11):860–862.
13. BOES, R. e HAGER, W. – Hydraulic design of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, volume 129, nº 9, páginas 671-679, setembro, 2003.
14. CANELLAS, A. V. B. et al. Influência da Aeração Induzida por Pilares no Escoamento em Vertedouros em Degraus. In: XXXI - SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS - SNGB 2017, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: CBDB, 2017.
15. CHANSON, H. (2008). Physical modelling, scale effects and self-similarity of stepped spillway flows. In *World Environmental and Water Resources Congress*, 316, Honolulu, USA.
16. CHAMANI e RAJARATNAM (1999) "Onset of skimming flow on Stepped Spillways – *Journal Hydraulic Engineering*, September, 1999 p 969 - 971
17. CHAMANI, M. R. e RAJARATNAM, N. – Characteristics of skimming flow over stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, abril, 1999.
18. CHANSON, H. (2002). *The hydraulics of stepped chutes and spillways*. Balkema, Rotterdam, Lisse, Netherlands.
19. CHANSON, H. – A study of air entrainment and aeration devices on a spillway model. Tese de doutoramento, Departamento de engenharia civil, Universidade de Canterbury, Nova Zelândia (em inglês), 1988.
20. CHANSON, H. - Comparison of energy dissipation between nappe and skimming flow regimes on stepped chutes. *Journal of Hydraulics Research*, volume 32, nº 2, 1994.
21. CHANSON, H. – History of stepped channels and spillways: a rediscovery of the "Wheel". *Can. Journal of Civil Engrg.* volume 22, páginas 247-259, 1995.
22. CHANSON, H. - Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. Pergamon, Oxford, UK, 261 páginas, 1994
23. CHANSON, H. – *Stepped Spillways Flows and Air Entrainment*. *Can. Journal of Civil Engrg*, junho, 1993.
24. CHANSON, H. e GONZALEZ, C. – Interactions between free-surface, free-stream turbulence and cavity recirculation in open channel flows:

- measurements and turbulence manipulation. 5th International Conference on Multiphase Flow, Yokohama, Japão, 30 de maio a 4 de junho, 2004.
25. CHANSON, H. e TOOMBES, L. - Experimental investigations of air entrainment in transition and skimming flows down a stepped chute. *Can. J. Civ. Engrg.*, volume 29, páginas 145-156, 2002.
26. CHANSON, H. Embankment overtopping protection systems. *Acta Geotechnica*, v 10, p. 305-318, 2015.
27. CHANSON, H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators. *Dam Engineering*, v. 11, n. 4, p. 205-242, 2001.
28. CHANSON, H.; YASUDA, Y.; OHTSU, I. - Flow resistance in skimming flows in stepped spillways and its modelling. *Can. J. Civ. Engrg.*, volume 29, páginas 809-819, 2002.
29. CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. Volume of Fluid Model for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. *Journal of Hydraulic Engineering*, [s. l.], v. 128, n. 7, p. 683–688, 2002.
30. CHONGGANG, S. - RCC dams in China. *Anais do 4º Simpósio Internacional sobre barragens de CCR*, páginas 15-25, Madri, Espanha, novembro, 2003. apud AMADOR et al. (2004)
31. CONTERATO, E. Escoamento sobre vertedouro em degraus com declividade 1V:0,75H: Caracterização das pressões e condições de aeração, 2011. 69f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.
32. DAI PRÁ, M. - Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:1H. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, agosto, 2004.
33. DAI PRÁ, M. et al. Um Estudo sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. *Revista Recursos Hídricos*, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 17–28, 2012. Disponível em: <http://www.aprh.pt/rh/v33n1-2.html>
34. DANESHFARAZ, R. et al. Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. *Advances and Applications in Fluid Mechanics*, [s. l.], v. 19, n. 4, p. 805–822, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.17654/FM019040805>

35. ELVIRO GARCIA, V. e MATEOS IGUÁCEL, C. – Aliviaderos: funcionamiento hidráulico. III Curso de presas de hormigón compactado, Madri, 17 e 18 de setembro, 1996.
36. ENDRES, L. A. M.; SCHUMACHER, A; CANELLAS, A. V. B., DA SILVA, F. A. “DELIMITAÇÃO DE VAZÕES EM FUNÇÃO DE PRESSÕES EXTREMAS SOBRE UMA CALHA DE VERTEDOURO EM DEGRAUS” Comitê Brasileiro de Barragens, XXXII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Salvador – BA – 20 a 23 de Maio de 2019
37. FRIZELL, K. H. e MELFORD, B. W. - Designing Spillways to Prevent Cavitation Damage. Concrete International, volume 13, nº 5, páginas 58-64, maio, 1991.
38. FRIZELL, K. H.; MATOS, J. e PINHEIRO, A. N. – Design of concrete stepped overlay protection for embankment dams. Hydraulics of Stepped Spillways, Minor e Hager (eds), Balkema, Rotterdam, 2000.
39. FRIZELL, K. W., RENNA, F. M., e MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering, v. 139, n. 6, p. 630-636, jun. 2013.
40. FRIZELL, K. W.; FRIZELL, K. H. Guidelines for Hydraulic Design of Stepped Spillways. Hydraulic Laboratory Report HL-2015-06. Denver, CO.
41. FRIZELL, K. W.; RENNA, F. M.; MATOS, J. Cavitation Potential of Flow on Stepped Spillways. Journal of Hydraulic Engineering, [s. l.], v. 139, n. 6, p. 630–636, 2013. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29HY.1943-7900.0000715>>
42. GAL'PERIN, R. S, KUZ'MIN K. K., NOVIKOVA, I. S., OSKOLKOV, A. G., SEMENKOV, V. M. e TSEDROV, G. N. – Cavitation in elements of hydraulic structures. Hydrotechnical Construction, Nº 8, páginas 726-732, agosto, 1971.
43. GOMES, J. Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H. 173 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006 (disponível em <http://www.bibliotecadigital.ufrgs.br/da.php?nrb=000597855&loc=2007&l=97d72246f2f170df>).

44. GONZALEZ, C. A. e CHANSON, H. Hydraulic design of stepped spillways and downstream energy dissipators for embankment dams. *Dam Engineering*, 17(4):223–244, 2007.
45. HOUGHTON, D. L., BORGE, O. E. e PAXTON, J. A. – Cavitation Resistance of some special concretes. *ACI Journal*, páginas 664-667, dezembro, 1978 apud CHANSON (1988)
46. HOUSTON, K. L. - Hydraulic model studies of Upper Stillwater dam stepped spilway and outlet works. REC-ERC-87-6 - U. S. Department of Interior Bureau of Reclamation, Denver, EUA, outubro de 1987.
47. HUNT, S. L., KADAVY, K. C., and HANSON, G. J. (2014). Simplistic design methods for moderate-sloped tepped chutes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(12):04014062. jets.
48. KOBUS, H. Hydraulic modelling - German association for water resources and land im; Bulletin 7. Parey, Hamburg. (1984)
49. KOSCHITZKY, H.-P. (1987). Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schussrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden. In Kobus, H., editor, Mitteilung 65. Institut für Wasserbau, TU Stuttgart. (apud TERRIER 2016)
50. LOBOSCO, R. J.; SCHULZ, H. E. Análise Computacional do Escoamento em Estruturas de Vertedouros em Degraus. *Mecânica Computacional*, [s. l.], v. XXIX, p. 3593–3600, 2010.
51. LOPARDO, R. A. – Modelación física de flujo macroturbulento en estructuras hidráulicas. *Apuntes de ingeniería*, volume 19 nº 2 páginas 5-20, Santiago de Chile, 1996.
52. LOPARDO, R. A. – Notas sobre fluctuaciones macroturbulentas de presión, medición, análisis y aplicación al resalto hidráulico. *Revista Latino Americana de Hidráulica*, Nº 2, páginas 109-154, São Paulo, Brasil, setembro 1987.
53. LOPARDO, R. A.; DE LIO, J. C.; VERNET, G. F. - Physical modeling cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. *International Conference on the Hydraulic Modelling of Civil Engineering Structures*, Coventry, Inglaterra, BHRA Fluid Engineering, Paper C3, páginas 109-121, 1982
54. LOPARDO, R.A., DE LIO, J.C. y VERNET, G.F., 1984: "Model prototype comparisons on pressure fluctuations in hydraulic jump energy dissipators",

- Symposium on Scale Effects in Modeling Hydraulic Structures, Esslingen am Neckar, Alemanha Federal, 1984, pág. 7.2.1- 7.2.5.
55. LOPARDO, R.A., BACCHIEGA, J.D., LOPARDO, M.C, FATTOR, C.A., MARMONTI, I. Y BERNARDO, T., Modelação Física Del Flujo Macroturbulento em Dissipador a resçlato Forzado. XXV Congresso Latino Americano de Hidráulica, Santiago, Chile, Agosto de 2014. 2014.
56. LOPES, P.; LEANDRO, J.; CARVALHO, R. F. Numerical procedure for free-surface detection using a Volume-of-Fluid model. *Journal of Hydro-Environment Research*, [s. l.], v. 21, p. 43–51, 2018.
57. MANSO, P. A. e SCHLEISS, A. – Stability of concrete macro-roughness linings for overflow protection of earth embankment dams. *Can. Journal Civil Eng.*, volume 29, páginas 762-776, 2002.
58. MATEOS IGUÁCEL, C. e ELVIRO GARCIA, V. - Initiation of aeration in stepped spillways. *Anais do 27º IAHR, San Francisco (EUA) – volume D*, páginas 589-594, 1997
59. MATOS, J. and MEIRELES, I. (2014). Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: engineering challenges, labyrinths of research. In 5th International Symposium on Hydraulic Structures, 1–30, Brisbane, Australia. University of Queensland.
60. MATOS, J. S. G. - Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Dissertação de doutoramento, Instituto Técnico Superior, Portugal, 1999
61. MATOS, J. S. G. e QUINTELA, A. C. – Descarregadores de cheias em degraus. Posição actual da avaliação da dissipação de energia. XI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e II Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa. 1995.
62. MATOS, J. S. G.; QUINTELA, A. e RAMOS, C. M. - Sobre a protecção contra erosão de cavitação em descarregadores de cheias em degraus. *Recursos Hídricos*, 2001.
63. MEIRELES, I. O. C – Caracterização do escoamento deslizante sobre turbilhões e energia específica residual em descarregadores de cheias em degraus. Dissertação de mestrado. Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico, 2004.

64. MEIRELES, I. O. de C. Hydraulics of stepped chutes: experimental-numerical-theoretical study. 2011. PhD thesis, Aveiro, Portugal, 2011.
65. MEIRELES, I., RENNA, F., MATOS, J., BOMBARDELLI, F. Skimming, Nonaerated Flow on Stepped Spillways over Roller Compacted Concrete Dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, Inglaterra, 2012.
66. NOVAKOSKI, C.K. “ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOIRO EM DEGRAUS COM AERAÇÃO INDUZIDA POR DEFLETOR E CÂMARA DE AR” 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, a previsão de publicação em 2022.
67. 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. P.S., MARQUES, M.G., MATOS, J. - “Extreme Negative Pressures and Cavitation Tendency on Steeply Sloping Stepped Spillways” *Dam World* 2018
68. OHTSU, I. e YASUDA, Y. – Characteristics of flow conditions on stepped channels. *Proc. 27th IAHR Biennial Congress*. São Francisco, páginas 583-588, 1997.*
69. OLINGER, J. C. - Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus. Tese de doutoramento. Universidade de São Paulo, 2001.
70. OLINGER, J. C. e BRIGHETTI, G. - Contribuição ao estudo da distribuição de pressões nos vertedouros em degraus. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP*, São Paulo, 2002.
71. OSMAR, Fabrício Machado. Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H . 2016. 84 f. , il. Dissertação (mestrado) - 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, 2016.
72. PAN, S. and SHAO, Y. Scale effects in modelling air demand by a ramp slot. In Kobus, H., editor, *Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, 4.7, 1–4, Esslingen am Neckar, Germany (1984) (apud TERRIER 2016)

73. PETERKA, A. J. - The effect of entrained air on cavitation pitting. Minnesota International Hydraulics Convention - Proceedings Minneapolis: IAHR / ASCE, páginas 507-518, Minneapolis, Estados Unidos, 1953.
74. PFISTER, M. (2008). Schussrinnenbelüfter Lufttransport ausgelöst durch interne Abflussstruktur. In Minor, H.-E., editor, VAW Mitteilungen 203. ETH Zürich. (apud TERRIER 2016)
75. PFISTER, M.; CHANSON, H. Two-phase air-water flows: Scale effects in physical modeling. *Journal of Hydrodynamics*, v. 26, p. 291-298. 2014.
76. PFISTER, M.; HAGER, W. H. Chute aerators I: Air transport characteristics. *Journal of Hydraulic Engineering*, p. 352-359. 2010.
77. PFISTER, M.; HAGER, W. H.; MINOR, H. E. Bottom aeration of stepped spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 132, p. 850-853. 2006.
78. PFISTER, M. and HAGER, W. H. (2014). History and significance of the Morton number in hydraulic engineering. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(5):02514001.
79. PINHEIRO, A. N. e RELVAS, A. T. – Descarregadores de cheias não convencionais sobre barragens de aterro. O presente e o futuro da sua aplicação em Portugal. *Recursos Hídricos*, volume 20, nº 1, maio, 1999.
80. PINHEIRO, A. N.; CUSTÓDIO, C. M.; RELVAS, A. T. – Spillways over earth dams lined with wedge-shaped pré-cast concrete blocs: design criteria, construction aspects and cost estimate. *Dam Maintenance and Rehabilitation*, Llanos et al. (eds), Swets e Zeitlinger, Lisse, 2003
81. PINTO, N. L. Model evaluation of aerators in shooting flow. In Kobus, H., editor, *Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, 4.2, 1–6, Esslingen am Neckar, Germany (1984) (apud TERRIER 2016)
82. PINTO, N. L. de S.; NEIDERT, S. H.; OTA, J. J. Aeration at high velocity flows. *Water Power and Dam Construction*, [s. l.], p. 34–38, 1982.
83. POVH, P. H. - Avaliação da energia a jusante de vertedouros em degraus com fluxos em regime skimming flow. Dissertação de mestrado. UFPR, dezembro, 2000.
84. PRESTES, A. C. et al (2019) “Influência da utilização de diferentes comprimentos de condutos flexíveis em medições de pressão na calha de um

- vertedouro em degraus – XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – ABRH – Foz do Iguaçu/PR – Brasil;
85. PRIEBE, P. S. “Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus” Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2020.
86. RENNA, F. M. - *Caratterizzazione fenomenologica del moto di un fluido bifásico lungo scaricatori a gradini*. Tese de doutoramento (em italiano), Universidade Técnica de Bari, Bari, Itália, 2004.
87. RUTSCHMANN, P. *BELÜFTUNGSEINBAUTEN IN SCHUSSRINNEN*. IN VISCHER, D., editor, *VAW Mitteilungen 97*. ETH Zürich. (1988) (apud TERRIER 2016)
88. SANAGIOTTO, D. G. - *Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, novembro de 2003.
89. SANAGIOTTO, D. G.; MARQUES, M. G. *Características do escoamento em vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H*. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, Brazil, v. 13, n. 4, p. 17–31, 2008.
90. SÁNCHEZ-JUNY, M. *Comportamento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de Hormigón compactado. Análisis del campo de presiones*. Dissertação de Doutorado, Universidade Politécnic da Catalunha, 2001
91. SARKARIA, G. S. e ANDRIOLO, F.R. – *Special factors in design of high RCC gravity dams part I*. *International Water Power & Dam Construction*, abril, 1995.
92. SIMÕES, A. L. A. *Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus: metodologias adimensionais para pré-dimensionamento*. 2008. 255 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Universidade de São
93. SIMÕES, A. L. A. *Escoamentos turbulentos em canais com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas*. 2012. PhD thesis, São Carlos, Brazil (in Portuguese), 2012.

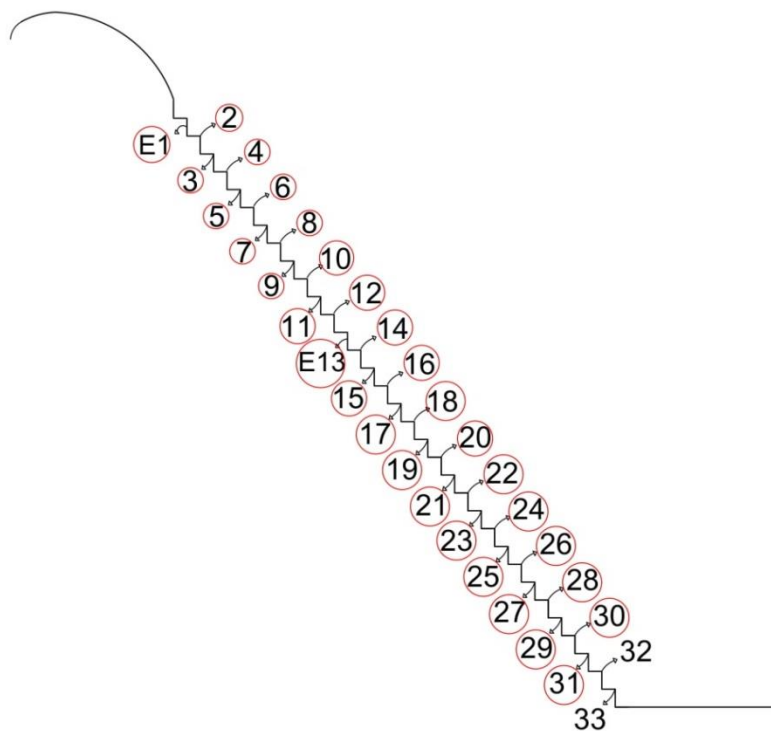
94. SIMÕES, A. L. A.; SCHULZ, H. E.; PORTO, R. de M. Stepped and smooth spillways: Resistance effects on stilling basin lengths. *Journal of Hydraulic Research*, [s. l.], v. 48, n. 3, p. 329–337, 2010.
95. SKRIPALLE, J. Zwangsbelüftung von Hochgeschwindigkeitsströmungen an zurückspringenden Stufen im Wasserbau. Mitteilung 124. Technische Universität, Berlin, Germany. (apud TERRIER 2016)
96. SORENSEN, Robert M – Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation – *Journal Hydraulic Engineering*, 1985, 111(12): 1461 1472
97. TABARI, M. M. R.; TAVAKOLI, S. Effects of Stepped Spillway Geometry on Flow Pattern and Energy Dissipation. *Arabian Journal for Science and Engineering*, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 1215–1224, 2016
98. TABBARA, M.; CHATILA, J.; AWWAD, R. Computational simulation of flow over stepped spillways. *Computers and Structures*, [s. l.], v. 83, p. 2215–2224, 2005.
99. TAKAHASHI, M. e OHTSU I. Aerated flow characteristics of skimming flow over stepped chutes *Journal of Hydraulic Research* Vol. 50, No. 4 (2012), pp. 427–434 <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2012.702859>
100. TAKAHASHI, M., YASUDA, Y., AND OHTSU, I. (2005). Effect of Reynolds number on characteristics of skimming flows in stepped channels. In 31st IAHR Congress, 2880–2889, Seoul, Korea.
101. TASSINARI, L. C. da S., SANAGIOTTO, D. G., MARQUES, M.G. , LAUFFER, L.L. & TRIERWEILER, E.D. “Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways -Combinação de abordagens experimental e numérica para determinar as principais características do escoamento sobre turbilhões em vertedouros em degraus” *Revista Brasileira de Recursos Hídricos Brazilian Journal of Water Resources Versão On-line* ISSN 2318-0331 RBRH, Porto Alegre, v. 25, e3, 2020
102. TEIXEIRA, E. D. et al. Efeito de Escala nos Valores de Pressão Média junto ao Fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico Submerso. [s. l.], v. 17, n. 2, p. 87–100, 2012.

103. TERRIER, S. Hydraulic performance of stepped spillway aerators and related downstream flow features. 2016. 317 f. Tese – Laboratory of Hydraulic Constructions, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2016.
104. TOMITA, Y. e SHIMA, A. – Mechanism of impulsive pressure generation and damage pit formation by bubble collapse. *J. Fluid Mech.*, volume 169, páginas 535-564, 1986.
105. TOZZI, M. J. - Caracterização / comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo, 1992
106. VOLKART, P. AND RUTSCHMANN, P. (1984) apud TERRIER (2016). Rapid flow in spillway chutes with and without deflectors: a model-prototype comparison. In Kobus, H., editor, *Scale Effects in Modelling Hydraulic Structures*, 4.5, 1–8, Esslingen am Neckar, Germany (apud Terrier (2016))
107. VOLKART, P.; RUTSCHMANN, P. Air entrainment devices (air slots), *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH-Zurich, Switzerland*, No. 72. 1984. (apud Terrier (2016)) não tem em Terrier 2016
108. WAHRHEIT-LENSING, A. (1996). Selbstbelüftung und Energieumwandlung beim Abfluss über treppenförmige Entlastungsanlagen. PhD Thesis, University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany (apud Terrier (2016))
109. WANG, S. DONG-MEI, H. WANG, C. Aerator of stepped chute in Murum Hydropower station. In: 2012 International Conference on Modern Hydraulic Engineering. 2012, Nanjing. *Anais... Nanjing: Procedia Engineering*, 2012, p. 803-807.
110. WOOD, I. R.; ACKERS, P. e LOVELESS, J. – General method for critical point on spillways. *Journal of Hydraulic Engineering*, volume 109, nº 2, fevereiro, 1983 Sorensen (1983),
111. ZHANG, G.; CHANSON, H. Hydraulics of the Developing Flow Region of Stepped Spillways. I: Physical Modeling and Boundary Layer Development. *Journal of Hydraulic Engineering*, [s. l.], v. 142, n. 7, p. 04016015, 2016. b. v
112. ZHANG, G.; CHANSON, H. Self-aeration in the rapidly – and Gradually – varying flow regions of steep smooth and stepped spillways (2015). DOI 10.1007/s10652-012-9442-z

11 ANEXOS

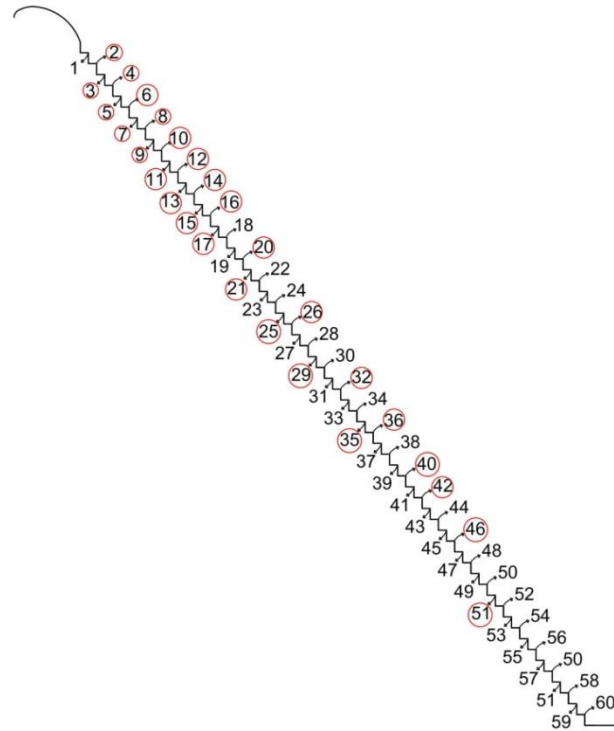
11.1 Anexo A – Posição dos degraus com medição LOH I.

LOH I - AERAÇÃO NATURAL



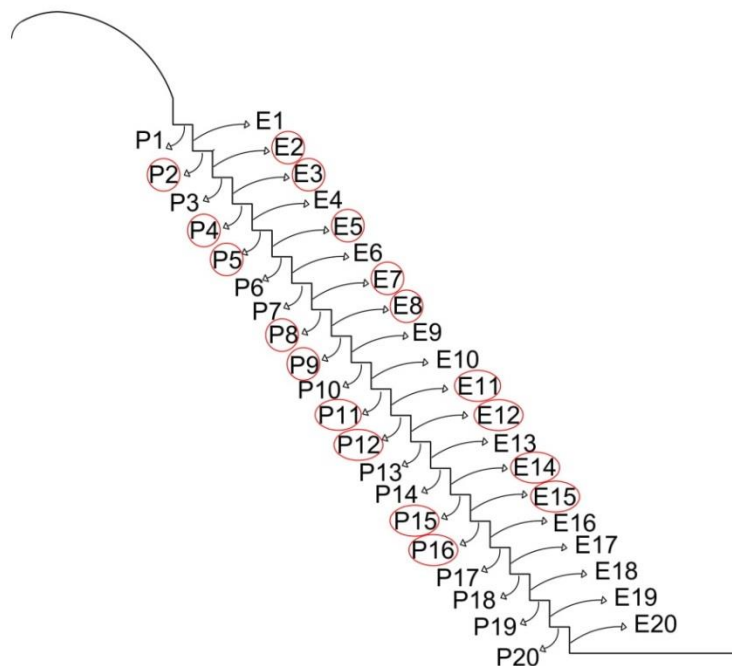
11.2 Anexo B – Posição dos degraus com medição LOH II. não confere com tabela do Anexo D

LOH II - AERAÇÃO NATURAL



11.3 Anexo C – Posição dos degraus com medição LAHE.

LAHE I - AERAÇÃO NATURAL



11.4 Anexo D Características do modelos de SANAGIOTTO (2003), CONTERATO (2011), DAI PRÁ (2004), AMADOR (2005) e dos modelo LAHE, LOH I E LOH II

	Sanagiotto (2003)			Conterato (2011)	Dai Prá (2004)			Amador (2005)
Local	Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)							*LHMFUPC
Inclinação	1V:0,75H				1V:1H			1V:0,8H
Inclinação (°)	53,13				45			51,38
Altura da calha (m)	2,44		2,45		2,44			4,45
Altura da ogiva (m)	0,44		0,47		0,44			Ogiva escalonada
Largura do canal (m)	0,4				0,4			0,6
Largura efetiva do canal (m)	0,4				0,4			0,6
Altura do espelho (cm)	3	6	9	6	3	6	9	7
Largura do patamar (cm)	2,25	4,5	6,75	4,5	3	6	9	5,6
Rugosidade do canal (m)	0,018	0,036	0,054	0,036	0,021	0,042	0,064	0,044
Número de degraus	66	33	22	33	72	36	24	33
Vazão específica (m ³ /s/m)	0,02 a 0,7			0,1 a 0,27	0,02 a 0,7			0,5 a 0,33
Altura crítica (m)	0,06 a 0,3			0,1 a 0,2	0,04 a 0,3			0,6 a 0,22
Nº de Froude - escoamento	7,9 a 3,0			5,9 a 4,0	10,8 a 3,0			5,6 a 2,9
Nº de Reynolds - escoamento	4,9E+04 a 6,9E+05			9,9E+04 a 2,7E+05	2,4E+04 a 6,9E+05			4,8E+04 a 3,3E+05
Nº de Weber - escoamento	146,7 a 618,2			211,3 a 365,2	102,6 a 618,2			128,0 a 373,4
Nº de Froude rugoso	7,4 a 103,5	2,6 a 36,6	1,4 a 19,9	5,2 a 14,3	2,9 a 80,7	1,0 a 28,5	0,6 a 15,5	1,9 a 13,1
Nº de Weber rugoso	156,0 a 197,8	220,7 a 279,7	270,4 a 342,6	228,8 a 248,4	165,5 a 214,8	234,0 a 303,7	286,6 a 372	191,7 a 236,4

N° de Reynolds rugoso	4,5E+04 a 5,7E+04	9,0E+04 a 1,1E+05	1,36E+05 a 1,72E+05	9,4E+04 a 1,0E+05	5,21E+04 a 6,77E+04	1,0E+05 a 1,35E+05	1,6E+05 a 2,0E+05	8,7E+04 a 1,0E+05
N° de Froude do degrau	5,7 a 7,3	4,1 a 5,2	3,3 a 4,2	4,2 a 4,6	5,7 a 7,3	4,0 a 5,2	3,3 a 4,2	3,0 a 3,7
N° de Reynolds do degrau	9,4E+04 a 1,2E+05	1,9E+05 a 2,4 E+05	2,8E+05 a 3,5E+05	1,9E+05 a 2,1E+05	9,2E+04 a 1,2E+05	1,8E+05 a 2,4E+05	2,7E+05 a 3,6E+05	1,7E+05 a 2,1E+05
N° de Weber do degrau	201,5 a 255,4	285,0 a 361,2	349,1 a 442,4	295,4 a 320,8	197,4 a 255,4	278,3 a 361,2	340,9 a 442,4	242,4 a 298,9
N° de pontos de medição	7 (2 na ogiva e 5 nos degraus)			20 degraus	7 (2 na ogiva e 5 nos degraus)			33
Altura relativa dos pontos de medição (em relação a altura da calha)	0,17H a 0,76H			0,2H a 0,67H	0,17H a 0,76H			0,072H a 0,52H
Número do degrau de medição - patamar	1; 12; 24; 36; 48	1; 6; 12; 18; 24	1; 4; 8; 12; 16	1 ao 20	1; 7; 19; 31; 43; 55	1; 4; 10; 16; 22; 28	1; 3; 7; 11; 15; 19	8; 12; 23
N° do degrau de medição - espelho	1; 12; 24; 36; 48	1; 6; 12; 18; 24	1; 4; 8; 12; 16	1 ao 20	1; 7; 19; 31; 43; 55	1; 4; 10; 16; 22; 28	1; 3; 7; 11; 15; 19	4; 7; 9; 11; 17; 18; 20; 22; 24
Posição do Transdutor	Eixo de simetria do patamar e do espelho e outros pontos,			Os transdutores foram colocados nos patamares e nos espelhos.	Eixo de simetria do patamar e do espelho e outros pontos,			Eixo de simetria do patamar e do espelho e outros pontos,
Posição da medição no patamar do degrau em relação a borda,	0,17; 0,5; 0,88	0,06; 0,35; 0,65; 0,94	0,04; 0,35; 0,65; 0,96	0,067	0,13; 0,5; 0,88	0,06; 0,35; 0,65; 0,94	0,04; 0,35; 0,65; 0,96	0,14; 0,29; 0,5; 0,73; 0,91
Posição da medição no espelho do degrau em relação a borda.	0,13; 0,5; 0,88	0,08; 0,36; 0,64; 0,92	0,06; 0,35; 0,65; 0,94	0,050	0,13; 0,5; 0,88	0,06; 0,35; 0,65; 0,94	0,04; 0,35; 0,65; 0,96	0,07; 0,16; 0,35; 0,5; 0,65; 0,79; 0,93
Estatística analisada	Pméd, σ , As, K, P0,1%, P1%, P5%, P95%, P99%, P99,9%, N0,1%, N1%; N5%, N99%, N99,9%							Pméd, σ

Frequência de aquisição dos dados (Hz)	50	128	50	100
Cálculo do comprimento de início da aeração e equação para a altura da lâmina nessa posição	$L_a/k = 9,7721(F^*)^{0,7014}$ $di/k = 0,3965(F^*)^{0,5975}$	$L_a/k = 12(F^*)^{(2/3)}$	$L_a/k = 9,7721(F^*)^{0,7014}$ $di/k = 0,3965(F^*)^{0,5975}$	$L_a/K = 5,982Fr^{*0,840}$
Cálculo para pressões adimensionalizadas	-	$C_p = P/((V_m^2/2g))$	-	$C_p = (p_m/\gamma)/(U^2/2g)$
Cálculo para posição ao longo da calha adimensionalizada	-	$s' = ((L - LA))/di$	$s' = ((L - Li))/di$	$s' = ((L - LA))/di$

*Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluídos da Universidade Politécnica da Catalunha

	LAHE	LOH I	LOH II
Local	Laboratório de Hidráulica Experimental (LAHE) /Furnas	Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)	
Inclinação	1V:0,75H		
Inclinação (°)	53,13		
Altura da calha (m)	2,24	2,42	3,89
Altura da ogiva (m)	0,44	0,44	0,29
Largura do canal (m)	1,15	0,4	0,5
Largura efetiva do canal (m)	1,15	0,4	0,5
Altura do espelho (cm)	9	6	6
Largura do patamar (cm)	6,75	4,5	4,5
Rugosidade do canal (m)	0,054	0,036	0,036
Número de degraus	20	33	60
Vazão específica (m³/s/m)	0,100 a 0,356	0,100 a 0,368	0,054 a 0,436

Altura crítica (m)	0,10 a 0,23	0,10 a 0,24	0.07 a 0.27
Nº de Froude - escoamento	6,2 a 4,3	5,3 a 3,4	6,17 a 3,14
Nº de Reynolds - escoamento	9,9E+04 a 3,7E+05	1,0E+05 a 3,5E+05	5.38E+04 a 4.99E+05
Nº de Weber - escoamento	214,5 a 459	204,1 a 406,1	139.96 a 481.79
Nº de Froude rugoso	2.84 a 10.11	5.22 a 19.2	2.82 a 22,79
Nº de Weber rugoso	287.56 a 352.18	286.84 a 319.88	226.80 a 290.25
Nº de Reynolds rugoso	143995.86 a 176356.22	1.4E+05 a 160183.1758	113569.85 a 145344.29
Nº de Froude do degrau	4.37 a 5.35	4.36 a 4.863	3.45 a 4.41
Nº de Reynolds do degrau	200660.28 a 245754.91	2.0E+05 a 223217.533	158261.21 a 202539.34
Nº de Weber do degrau	304.25 a 372.62	303.49 a 338.451704	239.96 a 307.10
Nº de pontos de medição	9	27	16
Número do degrau de medição – patamar	2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 15 e 16	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28	2, 4, 5, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 20, 25, 29, 35, 40, 46 e 51
Nº do degrau de medição - espelho	2, 3, 5, 7, 8, 11, 12, 14 e 15	2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28	2, 3, 5, 7, 8, 11, 12, 14, 15, 20, 25, 29, 35, 40, 46 e 51
Posição do Transdutor	Os transdutores foram colocados nos espelhos e nos degraus posteriores,	Os transdutores foram colocados nos patamares e nos espelhos,	Os transdutores foram colocados nos patamares e nos espelhos.
Posição relativa da tomada no espelho ¹	0,92	0,92	0,87
Posição relativa da tomada no patamar ²	0,92	0,91	0,82

Estadística analisada	Pmed, σ , As, K, P0,1%, P1%, P5%, P95%, P99%, P99,9%, N0,1%, N1%; N5%, N99%, N99,9%		
Frequência de aquisição dos dados (Hz)	100		
Cálculo do comprimento de início da aeração e equação para a altura da lâmina nessa posição	-	$La/k = 12(F^*)^{2/3}$	-
Cálculo para pressões adimensionalizadas	$Cp = P/\gamma/(Vm^2/2g)$		
Cálculo para posição ao longo da calha adimensionalizada	$s' = ((L - LA))/ha$		

¹relação entre a distância a partir da parte inferior do espelho até a quina do patamar e a base do mesmo

²relação entre a distância a partir da base do patamar até a quina do espelho e a altura do mesmo

11.5 Anexo E – Posição dos La, Lv*

Três modelos:

LOH I				LOH II				LAHE			
Logiva=0,78m - dl=0,075m				Logiva=0,52m – dl=0,075m				Logiva=0,78m – dl=0,1125m			
q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*	q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*	q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*
0.100	5	1.16	0.38	0.054	3	0.75	0.23	0.100	3	1.12	0.34
0.125	7	1.31	0.53	0.082	5	0.90	0.38	0.125	5	1.34	0.56
0.150	9	1.46	0.68	0.108	8	1.12	0.60	0.150	6	1.46	0.68
0.200	13	1.76	0.98	0.150	11	1.35	0.83	0.200	8	1.68	0.90
0.250	16	1.98	1.20	0.200	15	1.65	1.13	0.275	10	1.91	1.13
0.275	18	2.13	1.35	0.300	20	2.02	1.50	0.330	12	2.13	1.35
0.330	22	2.43	1.65	0.400	29	2.70	2.18	0.356	14	2.36	1.58
0.350	24	2.58	1.80	0.436	-	-	-	-	-	-	-
0.368	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Demais autores:

SANAGIOTTO 6CM				SANAGIOTTO 9CM				DAI PRÁ 6CM				DAI PRÁ 6CM				CONTERATO 6CM			
Logiva= 0.78 dl=0.075				Logiva= 0.78 dl=0.113				Logiva=0.57 dl=0.085				Logiva=0.57 dl=0.127				Logiva=0.78 dl=0.75			
q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*	q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*	q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*	q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*	q (m³/s/m)	Degrau	La	Lv*
0.030	1	0.86	0.08	0.100	3	1.12	0.34	0.050	2	0.74	0.17	0.100	3	0.95	0.38	0.100	3	1.01	0.23
0.050	2	0.93	0.15	0.200	5	1.34	0.56	0.100	4	0.91	0.34	0.150	5	1.21	0.64	0.150	8	1.38	0.60
0.100	4	1.08	0.30	0.320	11	2.02	1.24	0.150	10	1.42	0.85	0.200	5	1.21	0.64	0.200	13	1.76	0.98
0.200	14	1.83	1.05	0.450	18	2.81	2.03	0.200	11	1.50	0.93	0.250	7	1.46	0.89	0.250	15	1.91	1.13
0.325	22	2.43	1.65	-	-	-	-	0.250	14	1.76	1.19	0.325	9	1.72	1.15	0.275	17	2.06	1.28

11.6 Anexo F

11.6.1 Pressões nas posições de interesse no espelho Pei0,1% (Primeiro Degrau)

LOH I			LOH II			LAHE		
F*	Degrau	Pei0,1%	F*	Degrau	Pei0,1%	F*	Degrau	Pei0,1%
5.23	2	-0.36	2.82	3	-0.16	2.84	2	-0.42
6.53	2	-0.36	4.29	3	-0.28	3.56	2	-0.45
7.84	2	-0.36	5.64	3	-0.30	4.28	2	-0.47
10.45	2	-0.37	7.84	3	-0.32	5.69	2	-0.50
13.06	2	-0.35	10.45	3	-0.33	7.82	2	-0.50
14.37	2	-0.35	15.68	3	-0.36	9.40	2	-0.47
17.25	2	-0.35	20.90	3	-0.39	10.12	2	-0.47
18.29	2	-0.34	22.79	3	-0.40	-	-	-
19.21	2	-0.37	-	-	-	-	-	-

SANAGIOTTO 6cm			SANAGIOTTO 9cm			CONTERATO		
F*	Degrau	Pei0,1%	F*	Degrau	Pei0,1%	F*	Degrau	Pei0,1%
2.61	0	-0.12	2.84	0	-0.08	5.23	1	-0.39
5.23	0	-0.08	5.69	0	-0.10	7.84	1	-0.36
10.45	0	-0.02	9.25	0	-0.02	10.45	1	-0.39
16.98	0	0.01	12.80	0	0.01	13.06	1	-0.40
23.52	0	0.03	16.36	0	0.01	14.37	1	-0.39
30.05	0	0.04	19.91	0	0.02	15.68	1	-0.38
36.58	0	0.05	-	-	-	-	-	-

DAI PRÁ 6cm			DAI PRÁ 9cm			CONTERATO		
F*	Degrau	Pei0,1%	F*	Degrau	Pei0,1%	F*	Degrau	Pei0,1%
2.17	0	-0.04	2.37	0	-0.04	1.91	6	-0.30
4.34	0	-0.03	3.55	0	-0.02	3.82	6	-0.37
6.52	0	0.00	4.73	0	0.00	5.80	6	-0.27
8.69	0	0.02	5.91	0	0.03	7.70	6	-0.39
10.86	0	0.03	7.69	0	0.05	9.88	6	-0.41
14.12	0	0.05	10.64	0	0.07	11.52	6	-0.46
19.55	0	0.07	13.60	0	0.08	13.17	6	-0.45
24.98	0	0.08	16.56	0	0.09	-	-	-
30.41	0	0.09	-	-	-	-	-	-

Le0,1%*mim*; Pe0,1%*mim* (Início da Aeração)

LOH I				LOH II				LAHE			
F*	Degrau	Le*0,1 % min	Pe0,1% min	F*	Degrau	Le*0,1 % min	Pe0,1% min	F*	Degrau	Le*0,1 % min	Pe0,1% min
5.23	5	0.375	-0.551	2.82	3	0.225	-0.162	2.84	2	0.225	-0.415
6.53	6	0.450	-0.592	4.29	3	0.225	-0.285	3.56	3	0.338	-0.477
7.84	9	0.675	-0.653	5.64	3	0.225	-0.300	4.28	3	0.338	-0.504
10.45	12	0.900	-0.750	7.84	7	0.525	-0.326	5.69	5	0.563	-0.611
13.06	12	0.900	-0.789	10.45	14	1.050	-0.416	7.82	8	0.900	-0.726
14.37	13	0.975	-0.785	15.68	20	1.500	-0.575	9.40	14	1.575	-0.780
17.25	17	1.275	-0.804	20.90	25	1.875	-0.766	10.12	14	1.575	-0.900
18.29	18	1.350	-0.882	22.79	25	1.875	-0.780		-	-	-
19.21	18	1.350	-0.904		-	-	-		-	-	-

SANAGIOTTO 6CM				SANAGIOTTO 9CM				CONTERATO 6CM			
F*	Degrau	Le* 0,1% <i>min</i>	Pe 0,1% <i>min</i>	F*	Degrau	Le* 0,1% <i>min</i>	Pe 0,1% <i>min</i>	F*	Degrau	Le* 0,1% <i>min</i>	Pe 0,1% <i>min</i>
2.61	0	0.000	-0.120	2.84	3	0.338	-0.342	5.23	5	0.375	-0.430
5.23	5	0.375	-0.302	5.69	3	0.338	-0.400	7.84	8	0.600	-0.591
10.45	11	0.825	-0.352	9.25	11	1.238	-0.519	10.45	8	0.600	-0.667
16.98	17	1.275	-0.536	12.80	15	1.688	-0.659	13.06	15	1.125	-0.781
23.52	23	1.725	-0.537	16.36	15	1.688	-0.631	14.37	15	1.125	-0.799
30.05	23	1.725	-0.497	19.91	15	1.688	-0.734	15.68	19	1.425	-0.844
36.58	23	1.725	-0.534		-	-	-		-	-	-

* Os pontos cujo não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de menor pressão extrema mínima

DAI PRÁ 6CM				DAI PRÁ 9CM				AMADOR 7CM			
F*	Degrau	Le* 0,1% <i>min</i>	Pe 0,1% <i>min</i>	F*	Degrau	Le* 0,1% <i>min</i>	Pe 0,1% <i>min</i>	F*	Degrau	Le* 0,1% <i>min</i>	Pe 0,1% <i>min</i>
2.17	3	0.255	-0.187	2.36	18*	2.291*	-0.110*	5.90	6	0.538	-0.301
4.34	3	0.255	-0.240	3.54	6	0.764	-0.111	4.58	6	0.538	-0.371
6.51	3	0.255	-0.239	4.73	10	1.273	-0.120	4.00	29	2.600	-0.476
8.69	15	1.273	-0.276	5.91	10	1.273	-0.156	3.66	17	1.524	-0.644
10.82	15	1.273	-0.328	7.68	14	1.782	-0.230	3.41	16	1.434	-0.805
14.12	27	2.291	-0.374	10.64	18	2.291	-0.306	3.27	21	1.883	-0.812
19.55	27*	2.291*	-0.359*	13.59	18	2.291	-0.320	3.16	19	1.703	-0.819
24.98	27*	2.291*	-0.396*	16.55	18	2.291	-0.342		-	-	-
30.41	27*	2.291*	-0.381*		-	-	-		-	-	-

* Os pontos cujo não se tem certeza se o escoamento alcançou o ponto de menor pressão extrema mínima

Len*; Pen* Escoamento Constante

LOH I				LOH II				LAHE			
F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*
5.23	5	0.750	-0.245	2.82	3	0.375	-0.075	2.84	7	0.788	-0.160
6.53	6	0.975	-0.298	4.29	3	0.600	-0.112	3.56	7	0.788	-0.224
7.84	9	1.425	-0.213	5.64	3	0.825	-0.087	4.28	11	1.238	-0.239
10.45	12	1.575	-0.209	7.84	7	0.825	-0.171	5.69	12	1.350	-0.293
13.06	12	1.575	-0.345	10.45	14	1.500	-0.273	7.82	15	1.688	-0.482
14.37	13	1.950	-0.280	15.68	20	2.625	-0.313	9.4	15	1.688	-0.744
17.25	17	1.575	-0.532	20.9	25	3.825	-0.289	10.12	15	1.688	-0.806
18.29	18	1.575	-0.578	22.79	25	3.825	-0.318	-	-	-	-
19.21	18	1.500	-0.563	-	-	-	-	-	-	-	-

SANAGIOTTO 6CM				SANAGIOTTO 9CM				CONTERATO 6CM			
F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*
2.61	0	0.825	-0.06465	2.84	3	0.788	-0.094	5.23	5	0.675	-0.212
5.23	5	0.825	-0.09829	5.69	3	1.238	-0.212	7.84	8	0.975	-0.314
10.45	11	1.725	-0.10117	9.25	11	1.688	-0.436	10.45	8	1.500	-0.346
-	-	-	-	-	-	-	-	13.06	15	1.500	-0.546
-	-	-	-	-	-	-	-	14.37	15	1.500	-0.546
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

DAI PRÁ 6CM				DAI PRÁ 9CM				AMADOR			
F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*
2.17	9	0.764	-0.078	3.55	14	1.782	-0.106	1.91	24	2.151	-0.196
4.34	21	1.782	-0.070	4.73	10	1.273	-0.120	3.82	29	2.600	-0.336
6.52	21	1.782	-0.115	5.91	14	1.782	-0.137	7.70	19	1.703	-0.427
8.69	27	2.291	-0.146	7.69	18	2.291	-0.139	11.52	44	3.944	0.546
10.86	27	2.291	-0.228	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**11.6.2 Pressões nas posições de interesse no patamar Patamar $P_{pi99,9\%}$
(Primeiro Degrau)**

LOH I			LOH II			LAHE		
F*	Degrau	Ppi 99,9%	F*	Degrau	Ppi 99,9%	F*	Degrau	Ppi 99,9%
5.23	2	0.519	2.82	2	0.593	2.84	2	0.512
6.53	2	0.558	4.29	2	0.620	3.56	2	0.515
7.84	2	0.567	5.64	2	0.641	4.28	2	0.476
10.45	2	0.592	7.84	2	0.680	5.69	2	0.520
13.06	2	0.620	10.45	2	0.715	7.82	2	0.536
14.37	2	0.636	15.68	2	0.781	9.40	2	0.558
17.25	2	0.623	20.90	2	0.841	10.12	2	0.592
18.29	2	0.658	22.79	2	0.858	-	-	-
19.21	2	0.678	-	-	-	-	-	-

SANAGIOTTO 6cm			SANAGIOTTO 9cm			CONTERATO		
F*	Degrau	Ppi 99,9%	F*	Degrau	Ppi 99,9%	F*	Degrau	Ppi 99,9%
2.61	1	0.546	2.84	1	0.648	5.23	1	0.796
5.23	1	0.584	5.69	1	0.709	7.84	1	0.854
10.45	1	0.584	9.25	1	0.750	10.45	1	0.872
16.98	1	0.606	12.80	1	0.815	13.06	1	0.934
23.52	1	0.608	16.36	1	0.835	14.37	1	0.802
30.05	1	0.669	19.91	1	0.868	15.68	1	0.813
36.58	1	0.680	-	-	-	-	-	-

DAI PRÁ 6CM			DAI PRÁ 9CM		
F*	Degrau	Ppi 99,9%	F*	Degrau	Ppi 0,1%
-	-	-	2.37	1	0.313
4.34	1	0.360	3.55	1	0.347
6.52	1	0.382	4.73	1	0.384
8.69	1	0.386	5.91	1	0.386
10.86	1	0.418	7.69	1	0.405
14.12	1	0.415	10.64	1	0.460
19.55	1	0.437	13.60	1	0.507
24.98	1	0.454	16.56	1	0.526
30.41	1	0.479	-	-	-

Lpn e Ppn99,9 % - Escoamento Constante

LOH I				LOH II				LAHE			
F*	Degrau	Lpn*	Ppn*	F*	Degrau	Lpn*	Ppn*	F*	Degrau	Lpn*	Ppn*
5.23	10	0.750	0.756	2.82	5	0.375	0.439514	2.84	8	0.9	0.810862
6.53	12	0.900	0.799	4.29	8	0.6	0.437485	3.56	8	0.9	0.844748
7.84	19	1.425	0.996	5.64	11	0.825	0.786038	4.28	11	1.2375	0.908723
10.45	21	1.575	1.165	7.84	11	0.825	0.943888	5.69	12	1.35	1.042209
13.06	21	1.575	1.268	10.45	20	1.5	1.159329	7.82	15	1.6875	1.21341
14.37	26	1.950	1.150	15.68	35	2.625	1.137828	9.4	15	1.6875	1.363549
17.25	21	1.575	1.407	20.9	51	3.825	1.405844	10.12	15	1.6875	1.397312
18.29	21	1.575	1.466	22.79	51	3.825	1.534852	-	-		
19.21	20	1.500	1.507	-	-			-	-		

SANAGIOTTO 6CM				SANAGIOTTO 9CM				CONTERATO 6CM			
F*	Degrau	Lpn*	Ppn*	F*	Degrau	Lpn*	Ppn*	F*	Degrau	Lpn*	Ppn*
2.61	12	0.900	0.600	2.84	8	0.904	0.600	5.23	9	0.675	0.777
5.23	12	0.900	0.677	5.69	12	1.356	0.677	7.84	13	0.975	1.064
10.45	24	1.800	0.811	9.25	16	1.808	0.811	10.45	20	1.500	1.296
-				-				13.06	20	1.500	1.401
-				-				14.37	20	1.500	1.401
-				-				-			

DAI PRÁ 6CM				DAI PRÁ 9CM			
F*	Degrau	Len*	Pen*	F*	Degrau	Len*	Pen*
2.17	10	0.850	0.293	3.55	15	1.905	0.843
4.34	22	1.870	0.791	4.73	11	1.397	0.818
6.51	22	1.870	0.805	5.91	15	1.905	1.044
8.69	28	2.380	1.150	7.69	19	2.413	1.163
10.82	28	2.380	1.324				

11.6.3 Pressões nos três modelos–ESPELHO

Pressão Média (m.c.a) - LAHE							
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.356 (m³/s/m)
2	-0.022	-0.029	-0.025	-0.020	-0.017	-0.009	-0.001
3	-0.042	-0.049	-0.043	-0.045	-0.043	-0.028	-0.032
5	-0.037	-0.037	-0.033	-0.034	-0.023	-0.017	-0.019
7	-0.036	-0.026	-0.028	-0.027	-0.026	-0.016	-0.025
8	-0.035	-0.036	-0.043	-0.056	-0.068	-0.064	-0.054
11	-0.025	-0.022	-0.025	-0.023	-0.026	-0.016	-0.019
12	-0.031	-0.029	-0.031	-0.033	-0.042	-0.040	-0.041
14	-0.038	-0.036	-0.037	-0.037	-0.046	-0.055	-0.061
15	-0.017	-0.020	-0.020	-0.017	-0.018	-0.026	-0.028
P0.1% (m.c.a) - LAHE							
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.356 (m³/s/m)
2	-0.415	-0.449	-0.468	-0.495	-0.499	-0.474	-0.472
3	-0.374	-0.477	-0.504	-0.532	-0.543	-0.556	-0.542
5	-0.220	-0.365	-0.483	-0.611	-0.616	-0.644	-0.641
7	-0.160	-0.224	-0.312	-0.557	-0.614	-0.645	-0.630
8	-0.176	-0.231	-0.307	-0.596	-0.726	-0.732	-0.753
11	-0.217	-0.228	-0.239	-0.355	-0.686	-0.769	-0.751
12	-0.243	-0.250	-0.208	-0.293	-0.634	-0.727	-0.762
14	-0.279	-0.245	-0.247	-0.292	-0.548	-0.780	-0.900
15	-0.223	-0.237	-0.244	-0.265	-0.482	-0.744	-0.806
P99.9% (m.c.a) - LAHE							
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.356 (m³/s/m)
2	0.276	0.285	0.305	0.333	0.345	0.353	0.361
3	0.161	0.217	0.270	0.283	0.293	0.305	0.290
5	0.105	0.187	0.260	0.334	0.367	0.374	0.371
7	0.072	0.138	0.183	0.333	0.383	0.405	0.394
8	0.086	0.119	0.156	0.299	0.355	0.378	0.386
11	0.135	0.149	0.152	0.238	0.425	0.476	0.479
12	0.135	0.142	0.118	0.170	0.342	0.399	0.421
14	0.152	0.147	0.144	0.185	0.325	0.438	0.474
15	0.152	0.158	0.160	0.182	0.308	0.425	0.470

Pressão média (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.250 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.350 (m³/s/m)
2	-0.015	0.013	0.022	0.023	0.034	0.038	0.037	0.046
3	-0.057	-0.050	-0.059	#N/D	-0.046	-0.045	-0.037	-0.035
4	-0.012	-0.013	-0.006	-0.002	0.004	0.010	0.014	0.016
5	-0.042	-0.039	-0.043	-0.028	-0.022	-0.018	-0.008	-0.009
6	-0.016	-0.014	-0.009	-0.011	-0.007	-0.003	0.000	0.003
7	-0.040	-0.045	-0.042	-0.037	-0.033	-0.033	-0.026	-0.026
8	-0.025	-0.020	-0.015	-0.019	-0.016	-0.015	-0.013	-0.008
9	-0.037	-0.041	-0.049	-0.049	-0.052	-0.049	-0.045	-0.039
10	-0.025	-0.019	-0.018	-0.017	-0.013	-0.009	-0.005	-0.007

11	-0.016	-0.019	-0.023	-0.026	-0.022	#N/D	-0.013	-0.012
12	-0.031	-0.038	-0.042	-0.058	-0.052	#N/D	-0.049	-0.047
13	-0.016	-0.018	-0.016	-0.028	-0.020	-0.050	-0.020	-0.021
14	-0.016	-0.017	-0.016	-0.015	-0.021	-0.018	-0.012	-0.013
15	-0.017	-0.017	-0.017	-0.027	-0.025	-0.020	-0.022	-0.029
16	-0.022	-0.023	-0.024	-0.034	-0.040	-0.055	-0.044	-0.042
17	-	-0.018	-0.020	-0.022	-	-0.031	-0.027	-0.029
18	-0.032	-0.028	-0.027	-0.032	-0.035	-0.037	-0.035	-0.036
19	-0.037	-0.032	-0.033	-0.034	-0.042	-0.046	-0.052	-0.048
20	-0.023	-0.021	-0.021	-0.020	-0.021	-0.022	-0.019	#N/D
21	-0.032	-0.030	-0.028	-0.028	-0.034	-0.040	-0.045	-0.043
22	-0.018	-0.012	-0.011	-0.008	-0.011	-0.012	-0.013	-0.010
23	-0.030	-0.025	-0.022	-0.019	-0.025	-0.046	-0.039	-0.045
24	-0.025	-0.022	-0.022	-0.021	-0.020	-0.025	-	-0.038
25	-0.021	-0.018	-0.018	-0.013	-0.014	-0.016	-	-0.027
26	-0.030	-0.028	-0.024	-0.020	-0.020	-0.018	-0.026	-0.027
27	-0.035	-0.037	-0.035	-0.032	-0.031	-	-0.042	-0.042
28	-0.023	-0.027	-0.023	-0.014	-0.002	-0.009	-0.008	-0.008
P0.1% (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.250 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.350 (m³/s/m)
2	-0.358	-0.356	-0.365	-0.367	-0.349	-0.346	-0.351	-0.338
3	-0.358	-0.369	-0.415	-	-0.396	-0.416	-0.402	-0.408
4	-0.398	-0.427	-0.431	-0.441	-0.450	-0.454	-0.451	-0.473
5	-0.551	-0.560	-0.454	-0.423	-0.415	-0.431	-0.414	-0.433
6	-0.531	-0.592	-0.622	-0.657	-0.650	-0.632	-0.644	-0.672
7	-0.444	-0.562	-0.589	-0.635	-0.652	-0.664	-0.653	-0.687
8	-0.457	-0.519	-0.566	-0.604	-0.614	-0.652	-0.644	-0.678
9	-0.327	-0.503	-0.653	-0.687	-0.719	-0.734	-0.760	-0.754
10	-0.245	-0.376	-0.514	-0.595	-0.614	-0.620	-0.655	-0.676
11	-0.236	-0.360	-0.479	-0.615	-0.652	-	-0.699	-0.709
12	-0.288	-0.438	-0.574	-0.750	-0.789	-	-0.819	-0.827
13	-0.227	-0.298	-0.404	-0.668	-0.686	-0.785	-0.758	-0.760
14	-0.223	-0.286	-0.380	-0.598	-0.703	-0.726	-0.724	-0.741
15	-0.222	-0.251	-0.318	-0.553	-0.702	-0.693	-0.752	-0.752
16	-0.211	-0.257	-0.312	-0.604	-0.761	-0.766	-0.789	-0.791
17	-	-0.265	-0.322	-0.495	-	-0.761	-0.804	-0.812
18	-0.303	-0.341	-0.365	-0.584	-0.781	-0.845	-0.879	-0.882
19	-0.181	-0.189	-0.213	-0.323	-0.556	-0.636	-0.716	-0.737
20	-0.144	-0.154	-0.166	-0.248	-0.455	-0.497	-0.584	-
21	-0.139	-0.147	-0.158	-0.209	-0.345	-0.457	-0.532	-0.578
22	-0.138	-0.149	-0.160	-0.219	-0.387	-0.457	-0.564	-0.606
23	-0.137	-0.156	-0.167	-0.200	-0.312	-0.412	-0.541	-0.579
24	-0.143	-0.164	-0.176	-0.223	-0.361	-0.448	-	-0.674
25	-0.147	-0.175	-0.192	-0.223	-0.298	-0.392	-	-0.660
26	-0.115	-0.128	-0.139	-0.158	-0.227	-0.280	-0.445	-0.488
27	-0.148	-0.182	-0.206	-0.235	-0.286	-	-0.583	-0.663
28	-0.133	-0.167	-0.172	-0.204	-0.256	-0.289	-0.479	-0.537
P99.9% (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.250 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.350 (m³/s/m)
2	0.205	0.236	0.248	0.259	0.280	0.284	0.283	0.296
3	0.114	0.135	0.130	-	0.163	0.168	0.176	0.184
4	0.220	0.224	0.228	0.246	0.266	0.283	0.295	0.292
5	0.338	0.290	0.244	0.256	0.268	0.273	0.285	0.289
6	0.341	0.361	0.388	0.403	0.434	0.427	0.436	0.436

7	0.198	0.248	0.264	0.279	0.301	0.308	0.323	0.324
8	0.276	0.249	0.278	0.285	0.316	0.317	0.333	0.337
9	0.178	0.270	0.308	0.361	0.366	0.385	0.396	0.406
10	0.135	0.220	0.263	0.308	0.339	0.338	0.352	0.354
11	0.130	0.190	0.243	0.307	0.308	-	0.335	0.345
12	0.149	0.199	0.253	0.300	0.322	-	0.335	0.336
13	0.103	0.140	0.190	0.256	0.294	0.266	0.302	0.314
14	0.110	0.139	0.177	0.258	0.299	0.293	0.320	0.319
15	0.114	0.138	0.171	0.247	0.297	0.320	0.334	0.317
16	0.130	0.143	0.178	0.295	0.375	0.366	0.398	0.407
17	-	0.138	0.174	0.269	-	0.395	0.416	0.412
18	0.140	0.158	0.175	0.258	0.336	0.354	0.377	0.368
19	0.084	0.097	0.109	0.178	0.287	0.337	0.374	0.380
20	0.078	0.087	0.097	0.148	0.257	0.284	0.329	-
21	0.060	0.073	0.080	0.111	0.183	0.229	0.282	0.296
22	0.081	0.104	0.109	0.145	0.238	0.276	0.354	0.372
23	0.062	0.086	0.095	0.119	0.174	0.201	0.292	0.294
24	0.077	0.093	0.096	0.130	0.207	0.252	-	0.357
25	0.088	0.111	0.123	0.153	0.202	0.254	-	0.393
26	0.041	0.055	0.068	0.085	0.125	0.148	0.226	0.249
27	0.062	0.085	0.102	0.129	0.158	-	0.303	0.331
28	0.069	0.086	0.102	0.136	0.175	0.187	0.291	0.324

Pressão média (m.c.a) - LOH II								
Degraus	0.054 (m³/s/m)	0.082 (m³/s/m)	0.108 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.300 (m³/s/m)	0.400 (m³/s/m)	0.436 (m³/s/m)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-0.015	-0.030	-0.037	-0.037	-0.035	-0.028	-0.018	-0.016
5	-0.014	-0.014	-0.013	-0.007	0.003	0.017	0.030	0.032
7	-0.012	-0.012	-0.012	-0.008	0.001	0.017	0.030	0.034
8	-0.008	-0.006	-0.003	-0.001	0.001	0.016	0.030	0.033
11	-0.012	-0.011	-0.011	-0.009	-0.003	0.010	0.020	0.023
12	-0.014	-0.013	-0.012	-0.013	-0.015	-0.006	0.009	0.013
14	-0.014	-0.011	-0.009	-0.010	-0.012	-0.006	0.006	0.010
15	-0.012	-0.008	-0.005	-0.005	-0.002	0.004	0.013	0.017
20	-0.015	-0.015	-0.013	-0.011	-0.012	-0.020	-0.020	-0.019
25	-0.020	-0.021	-0.024	-0.023	-0.024	-0.034	-0.051	-0.051
29	-0.011	-0.009	-0.008	-0.006	-0.003	-	-	-
35	-0.012	-0.010	-0.010	-0.009	-0.007	-0.004	-0.011	-0.013
40	-0.010	-0.010	-0.008	-0.004	-0.001	0.007	0.004	0.002
46	-0.009	-0.006	-0.004	-0.002	0.000	0.010	0.011	0.011
51	-0.018	-0.017	-0.018	-0.017	-0.016	-0.012	-0.011	-0.012
P0.1% (m.c.a) - LOH II								
Degraus	0.054 (m³/s/m)	0.082 (m³/s/m)	0.108 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.300 (m³/s/m)	0.400 (m³/s/m)	0.436 (m³/s/m)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-0.162	-0.285	-0.300	-0.323	-0.327	-0.361	-0.391	-0.401
5	-0.075	-0.188	-0.242	-0.255	-0.281	-0.299	-0.311	-0.303
7	-0.075	-0.143	-0.257	-0.326	-0.341	-0.363	-0.369	-0.362
8	-0.066	-0.112	-0.201	-0.277	-0.292	-0.319	-0.325	-0.334
11	-0.051	-0.062	-0.087	-0.171	-0.207	-0.221	-0.237	-0.226
12	-0.097	-0.119	-0.153	-0.289	-0.370	-0.399	-0.473	-0.461
14	-0.103	-0.128	-0.150	-0.250	-0.416	-0.479	-0.535	-0.541
15	-0.087	-0.113	-0.123	-0.200	-0.339	-0.439	-0.475	-0.465

Degraus	0.054 (m ³ /s/m)	0.082 (m ³ /s/m)	0.108 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.300 (m ³ /s/m)	0.400 (m ³ /s/m)	0.436 (m ³ /s/m)
20	-0.097	-0.131	-0.162	-0.185	-0.273	-0.575	-0.658	-0.653
25	-0.117	-0.145	-0.190	-0.218	-0.267	-0.533	-0.766	-0.780
29	-0.124	-0.147	-0.162	-0.181	-0.190	-	-	-
35	-0.092	-0.119	-0.136	-0.169	-0.227	-0.313	-0.575	-0.664
40	-0.110	-0.163	-0.206	-0.260	-0.340	-0.402	-0.612	-0.708
46	-0.111	-0.161	-0.209	-0.268	-0.334	-0.420	-0.557	-0.665
51	-0.085	-0.101	-0.117	-0.141	-0.161	-0.228	-0.289	-0.318
P99.9% (m.c.a) - LOH II								
Degraus	0.054 (m ³ /s/m)	0.082 (m ³ /s/m)	0.108 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.300 (m ³ /s/m)	0.400 (m ³ /s/m)	0.436 (m ³ /s/m)
-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	0.088	0.144	0.152	0.160	0.177376	0.206096	0.239129	0.257471
5	0.039	0.109	0.154	0.175	0.202	0.242	0.260	0.270
7	0.045	0.099	0.164	0.212	0.241	0.277	0.310	0.317
8	0.043	0.077	0.134	0.188	0.205	0.241	0.278	0.288
11	0.020	0.030	0.042	0.088	0.116	0.146	0.170	0.171
12	0.056	0.072	0.096	0.180	0.225	0.269	0.316	0.329
14	0.067	0.089	0.108	0.178	0.276	0.334	0.390	0.391
15	0.052	0.079	0.097	0.144	0.225	0.295	0.327	0.343
20	0.058	0.084	0.103	0.127	0.181	0.321	0.366	0.393
25	0.067	0.084	0.118	0.140	0.166	0.309	0.442	0.446
29	0.070	0.092	0.103	0.121	0.130	-	-	-
35	0.061	0.084	0.100	0.132	0.167	0.226	0.379	0.424
40	0.049	0.076	0.106	0.138	0.186	0.232	0.339	0.386
46	0.055	0.091	0.129	0.177	0.221	0.294	0.388	0.437
51	0.044	0.060	0.071	0.092	0.108	0.163	0.204	0.219

11.6.4 Pressões nos três modelos - PATAMAR

Pressão Média (m.c.a) - LAHE							
Degraus	0.100 (m ³ /s/m)	0.125 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.275 (m ³ /s/m)	0.330 (m ³ /s/m)	0.356 (m ³ /s/m)
2	0.144	0.143	0.136	0.174	0.182	0.187	0.201
4	0.166	0.201	0.199	0.223	0.233	0.255	0.255
5	0.155	0.220	0.236	0.251	0.256	0.282	0.271
8	0.138	0.156	0.181	0.230	0.265	0.278	0.279
9	0.130	0.150	0.169	0.236	0.276	0.292	0.301
11	0.147	0.156	0.163	0.209	0.284	0.288	0.299
12	0.173	0.179	0.183	0.211	0.298	0.321	0.332
15	0.156	0.177	0.175	0.191	0.234	0.266	0.272
16	0.177	0.200	0.206	0.208	0.248	0.317	0.326
P0.1% (m.c.a) LAHE							
Degraus	0.100 (m ³ /s/m)	0.125 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.275 (m ³ /s/m)	0.330 (m ³ /s/m)	0.356 (m ³ /s/m)
2	-0.056	-0.072	-0.119	-0.074	-0.081	-0.081	-0.063
4	0.015	-0.009	-0.039	-0.024	-0.033	-0.004	-0.001
5	0.030	0.029	0.015	-0.022	-0.019	0.000	-0.010
8	-0.253	-0.261	-0.257	-0.342	-0.387	-0.395	-0.385
9	-0.284	-0.281	-0.292	-0.350	-0.414	-0.440	-0.431
11	-0.300	-0.294	-0.290	-0.310	-0.400	-0.422	-0.418
12	-0.304	-0.289	-0.276	-0.286	-0.363	-0.362	-0.377
15	-0.324	-0.325	-0.321	-0.309	-0.361	-0.431	-0.454
16	-0.307	-0.306	-0.293	-0.291	-0.309	-0.334	-0.339
P99.9% (m.c.a) - LAHE							
Degraus	0.100 (m ³ /s/m)	0.125 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.275 (m ³ /s/m)	0.330 (m ³ /s/m)	0.356 (m ³ /s/m)
2	0.512	0.515	0.476	0.520	0.536	0.558	0.592
4	0.399	0.492	0.495	0.517	0.552	0.558	0.580
5	0.377	0.489	0.532	0.566	0.592	0.610	0.616
8	0.811	0.845	0.887	1.099	1.223	1.272	1.269
9	0.785	0.848	0.912	1.156	1.307	1.377	1.364
11	0.911	0.902	0.909	1.095	1.378	1.406	1.440
12	0.950	0.942	0.927	1.042	1.337	1.429	1.449
15	0.906	0.974	0.951	0.995	1.213	1.364	1.397
16	1.021	1.069	1.051	1.074	1.228	1.405	1.499

Pressão média (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m ³ /s/m)	0.125 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.250 (m ³ /s/m)	0.275 (m ³ /s/m)	0.330 (m ³ /s/m)	0.350 (m ³ /s/m)
2	0.102	0.123	0.139	0.137	0.147	0.149	0.139	0.156
3	0.142	0.140	0.115	0.140	0.150	0.148	0.173	0.168
4	0.189	0.190	0.200	0.213	0.225	0.225	0.225	0.236
5	0.139	0.136	0.109	0.136	0.135	0.146	0.166	0.164
6	0.193	0.206	0.210	0.209	0.225	0.226	0.229	0.238
7	0.154	0.165	0.150	0.168	0.169	0.185	0.196	0.201
8	0.175	0.206	0.211	0.218	0.226	0.234	0.239	0.244

Pressão média (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m ³ /s/m)	0.125 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.250 (m ³ /s/m)	0.275 (m ³ /s/m)	0.330 (m ³ /s/m)	0.350 (m ³ /s/m)
9	0.140	0.177	0.170	0.183	0.194	0.199	0.211	0.211
10	0.144	0.181	0.202	0.219	0.226	0.229	0.240	0.240
11	0.125	0.149	0.169	0.183	0.188	0.198	0.215	0.211
12	0.139	0.166	0.194	0.228	0.238	0.239	0.265	0.253
13	0.137	0.153	0.180	0.202	0.217	0.214	0.230	0.227
14	0.133	0.147	0.173	0.230	0.232	0.239	0.251	0.250
15	0.135	0.143	0.163	0.208	0.195	0.224	0.237	0.221
16	0.152	0.159	0.177	0.268	0.277	0.262	0.270	0.300
17	0.104	0.118	0.127	0.177	0.194	0.199	0.207	0.210
18	0.154	0.159	0.164	0.228	0.272	0.278	0.290	0.291
19	0.139	0.146	0.144	0.194	0.231	0.233	0.250	0.300
20	0.123	0.128	0.132	0.172	0.223	0.233	0.253	-
21	0.136	0.147	0.148	0.183	0.223	0.232	0.245	0.250
22	0.114	0.124	0.127	0.150	0.202	0.217	0.242	0.244
23	0.154	0.166	0.168	0.196	0.241	0.261	0.293	0.297
24	0.137	0.149	0.151	0.165	0.205	-	0.252	0.263
25	0.132	0.151	0.157	0.174	0.216	-	0.267	0.262
26	0.141	0.166	-	0.195	0.230	0.247	0.300	0.306
27	0.137	0.155	0.164	0.176	-	0.221	0.271	0.280
28	0.140	0.164	0.179	0.201	0.225	0.245	0.288	0.300
P0.1% (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m ³ /s/m)	0.125 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.250 (m ³ /s/m)	0.275 (m ³ /s/m)	0.330 (m ³ /s/m)	0.350 (m ³ /s/m)
2	-0.195	-0.178	-0.174	-0.189	-0.201	-0.204	-0.212	-0.206
3	-0.221	-0.217	-0.244	-0.231	-0.236	-0.234	-0.197	-0.200
4	-0.143	-0.141	-0.144	-0.137	-0.141	-0.139	-0.157	-0.133
5	-0.185	-0.188	-0.220	-0.209	-0.223	-0.232	-0.216	-0.217
6	-0.187	-0.182	-0.182	-0.195	-0.200	-0.197	-0.202	-0.189
7	-0.113	-0.111	-0.125	-0.116	-0.125	-0.127	-0.116	-0.118
8	-0.101	-0.098	-0.102	-0.107	-0.115	-0.101	-0.101	-0.096
9	-0.277	-0.329	-0.408	-0.433	-0.442	-0.433	-0.428	-0.430
10	-0.230	-0.258	-0.278	-0.317	-0.328	-0.335	-0.344	-0.338
11	-0.177	-0.198	-0.240	-0.290	-0.288	-0.285	-0.273	-0.292
12	-0.205	-0.204	-0.219	-0.248	-0.255	-0.259	-0.243	-0.262
13	-0.149	-0.176	-0.198	-0.265	-0.288	-0.276	-0.278	-0.278
14	-0.097	-0.116	-0.121	-0.146	-0.156	-0.248	-0.249	-0.259
15	-0.297	-0.316	-0.354	-0.406	-0.473	-0.460	-0.460	-0.487
16	-0.316	-0.261	-0.261	-0.302	-0.377	-0.429	-0.417	-0.398
17	-0.392	-0.386	-0.406	-0.473	-0.535	-0.558	-0.570	-0.580
18	-0.204	-0.201	-0.208	-0.251	-0.339	-0.340	-0.342	-0.364
19	-0.238	-0.239	-0.256	-0.270	-0.346	-0.414	-0.431	-0.397
20	-0.332	-0.325	-0.329	-0.351	-0.410	-0.409	-0.459	-
21	-0.299	-0.297	-0.293	-0.316	-0.311	-0.364	-0.408	-0.418
22	-0.365	-0.357	-0.336	-0.387	-0.428	-0.450	-0.533	-0.526
23	-0.191	-0.189	-0.197	-0.206	-0.201	-0.238	-0.301	-0.316
24	-0.340	-0.340	-0.341	-0.358	-0.382	-	-0.451	-0.453
25	-0.350	-0.393	-0.399	-0.418	-0.410	-	-0.577	-0.638
26	-0.262	-0.287	-	-0.294	-0.326	-0.346	-0.417	-0.430

Pressão média (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.250 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.350 (m³/s/m)
27	-0.262	-0.293	-0.300	-0.310	-	-0.351	-0.414	-0.428
28	-0.308	-0.343	-0.337	-0.345	-0.358	-0.364	-0.440	-0.476
P99.9% (m.c.a) - LOH I								
Degraus	0.100 (m³/s/m)	0.125 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.250 (m³/s/m)	0.275 (m³/s/m)	0.330 (m³/s/m)	0.350 (m³/s/m)
2	0.519	0.558	0.567	0.592	0.620	0.636	0.623	0.658
3	0.607	0.626	0.609	0.661	0.674	0.673	0.685	0.699
4	0.718	0.707	0.732	0.752	0.817	0.817	0.842	0.852
5	0.589	0.600	0.572	0.620	0.650	0.635	0.676	0.687
6	0.678	0.705	0.724	0.737	0.779	0.771	0.796	0.813
7	0.518	0.538	0.521	0.555	0.575	0.575	0.594	0.606
8	0.563	0.585	0.604	0.628	0.657	0.645	0.661	0.665
9	0.868	1.026	1.087	1.173	1.180	1.170	1.201	1.195
10	0.756	0.904	0.961	1.053	1.118	1.095	1.125	1.174
11	0.632	0.737	0.849	0.943	0.945	0.968	1.004	1.000
12	0.705	0.799	0.876	0.992	1.051	1.051	1.109	1.064
13	0.548	0.633	0.719	0.850	0.900	0.890	0.917	0.917
14	0.487	0.547	0.626	0.768	0.827	1.018	0.985	0.999
15	0.816	0.869	0.958	1.162	1.192	1.263	1.315	1.290
16	0.868	0.953	1.001	1.202	1.307	1.290	1.349	1.389
17	0.818	0.877	0.923	1.155	1.329	1.324	1.413	1.438
18	0.908	0.960	0.992	1.173	1.300	1.319	1.393	1.426
19	0.938	0.982	0.996	1.148	1.292	1.300	1.431	1.477
20	0.918	0.985	1.011	1.118	1.352	1.359	1.503	-
21	0.991	1.009	1.000	1.165	1.268	1.349	1.407	1.466
22	0.993	0.997	1.010	1.119	1.313	1.377	1.537	1.556
23	1.020	1.094	1.068	1.223	1.297	1.358	1.508	1.537
24	1.035	1.088	1.088	1.153	1.365	-	1.549	1.627
25	1.027	1.122	1.139	1.246	1.348	-	1.614	1.661
26	0.713	0.841	-	0.948	1.080	1.150	1.354	1.394
27	0.733	0.832	0.870	0.936	-	1.115	1.316	1.411
28	0.773	0.901	0.949	1.005	1.104	1.173	1.364	1.402

Pressão média (m.c.a) - LOH II								
Degraus	0.054 (m³/s/m)	0.082 (m³/s/m)	0.108 (m³/s/m)	0.150 (m³/s/m)	0.200 (m³/s/m)	0.300 (m³/s/m)	0.400 (m³/s/m)	0.436 (m³/s/m)
2	0.149	0.162	0.175	0.190	0.198	0.229	0.270	0.279
-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.082	0.121	0.129	0.144	0.163	0.181	0.203	0.208
8	0.080	0.118	0.158	0.183	0.186	0.216	0.255	0.260
9	0.113	0.139	0.164	0.200	0.223	0.246	0.279	0.289
11	0.105	0.119	0.136	0.180	0.208	0.231	0.257	0.264
12	0.102	0.116	0.135	0.179	0.198	0.227	0.262	0.274
15	0.130	0.149	0.152	0.184	0.222	0.267	0.298	0.306
16	0.119	0.139	0.148	0.171	0.211	0.259	0.298	0.307
20	0.099	0.124	0.143	0.152	0.183	0.259	0.291	0.300
25	0.112	0.137	0.158	0.166	0.180	0.243	0.313	0.325
29	0.102	0.129	0.143	0.161	0.176	0.227	0.308	0.324

35	0.098	0.123	0.138	0.153	0.175	0.199	0.267	0.290
40	0.088	0.105	0.125	0.147	0.180	0.205	0.257	0.283
46	0.064	0.087	0.108	0.130	0.158	0.186	0.219	0.233
51	0.091	0.112	0.129	0.152	0.171	0.208	0.237	0.251
P0.1% (m.c.a) - LOH II								
Degraus	0.054 (m ³ /s/m)	0.082 (m ³ /s/m)	0.108 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.300 (m ³ /s/m)	0.400 (m ³ /s/m)	0.436 (m ³ /s/m)
2	-0.212	-0.203	-0.192	-0.185	-0.208	-0.196	-0.200	-0.205
-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-0.154	-0.208	-0.231	-0.243	-0.242	-0.247	-0.263	-0.256
8	-0.073	-0.100	-0.120	-0.137	-0.143	-0.133	-0.133	-0.130
9	-0.162	-0.198	-0.222	-0.254	-0.281	-0.283	-0.308	-0.297
11	-0.185	-0.225	-0.247	-0.284	-0.306	-0.337	-0.365	-0.358
12	-0.097	-0.117	-0.140	-0.199	-0.258	-0.311	-0.325	-0.339
15	-0.090	-0.096	-0.093	-0.138	-0.180	-0.228	-0.253	-0.276
16	-0.105	-0.126	-0.120	-0.139	-0.187	-0.247	-0.269	-0.267
20	-0.251	-0.294	-0.333	-0.328	-0.305	-0.365	-0.419	-0.430
25	-0.213	-0.216	-0.255	-0.254	-0.253	-0.317	-0.401	-0.402
29	-0.239	-0.264	-0.280	-0.301	-0.300	-0.367	-0.461	-0.484
35	-0.237	-0.280	-0.309	-0.313	-0.345	-0.369	-0.481	-0.525
40	-0.301	-0.395	-0.439	-0.483	-0.538	-0.527	-0.596	-0.645
46	-0.250	-0.330	-0.385	-0.431	-0.486	-0.519	-0.630	-0.655
51	-0.232	-0.274	-0.306	-0.323	-0.353	-0.395	-0.430	-0.471
P99.9% (m.c.a) - LOH II								
Degraus	0.054 (m ³ /s/m)	0.082 (m ³ /s/m)	0.108 (m ³ /s/m)	0.150 (m ³ /s/m)	0.200 (m ³ /s/m)	0.300 (m ³ /s/m)	0.400 (m ³ /s/m)	0.436 (m ³ /s/m)
2	0.593	0.620	0.641	0.680	0.715	0.781	0.841	0.858
-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	0.440	0.581	0.623	0.679	0.741	0.784	0.861	0.841
8	0.303	0.437	0.557	0.631	0.657	0.769	0.808	0.826
9	0.499	0.621	0.708	0.821	0.897	1.005	1.100	1.124
11	0.606	0.688	0.786	0.944	1.048	1.158	1.273	1.249
12	0.612	0.694	0.748	0.918	1.013	1.148	1.230	1.250
15	0.704	0.801	0.823	0.939	1.020	1.212	1.350	1.349
16	0.746	0.843	0.877	0.938	1.066	1.260	1.394	1.446
20	0.807	0.964	1.078	1.124	1.159	1.404	1.591	1.625
25	0.612	0.696	0.792	0.871	0.924	1.203	1.489	1.539
29	0.606	0.714	0.770	0.850	0.915	1.164	1.542	1.584
35	0.612	0.747	0.828	0.889	1.025	1.138	1.557	1.646
40	0.761	0.926	1.079	1.231	1.429	1.522	1.872	2.006
46	0.568	0.719	0.845	0.944	1.119	1.318	1.556	1.707
51	0.616	0.720	0.813	0.911	1.010	1.235	1.406	1.535

11.7 Anexo G – Equações para o cálculo da concentração pontual de ar segundo os autores

Autor	Equações propostas	Comentários
Straub e Anderson (1958)	$C = C_T \cdot \left(\frac{y}{d_T - y}\right)^{z'}$ $\frac{1 - C}{1 - C_T} = \frac{2}{y' \sqrt{\pi}} \cdot \int_{y'}^{+\infty} e^{-\left(\frac{y'}{h}\right)^2} dy'$	Escoamento uniforme – lower region ($y < dt$) Escoamento uniforme – upper region ($y > dt$)
Rao e Gangadharaiiah (1971)	$\frac{1 - C}{1 - C_T} = \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{y}{b.E.(x - L_i)}\right)\right)$	Escoamento gradualmente variado ($0 < y < Y_{90}$)
Wood (1984)	$C = \frac{B'}{B' + \exp\left(-G' \cdot \cos\theta \cdot \left(\frac{y}{Y_{90}}\right)^2\right)}$	Escoamentos uniforme e gradualmente variado ($0 < y < Y_{90}$)
Chanson (1995)	$C = 1 - \tan^2\left(K' - \frac{y/Y_{90}}{2 \cdot D'}\right)$	Escoamentos uniforme e gradualmente variado ($0 < y < Y_{90}$) $K' = 0,32745 + \frac{0,5}{D'}$ $D' = D' = 0,75699 \times C_{mean}^{1,0104}$
Chanson (2002)	$C = 1 - \tan^2\left(K'' - \frac{y/Y_{90}}{2 \cdot D_0} + \frac{y/Y_{90} - 1/3}{3 \cdot D_0}\right)$	Escoamentos uniforme e gradualmente variado ($0 < y < Y_{90}$) $D' = \frac{D_0}{1 - 2 \cdot \left(\frac{y}{Y_{90}} - \frac{1}{3}\right)^2}$ $K'' = 0,32745 + \frac{0,40123}{D_0}$ $D_0 = -2767 \cdot \ln(1,0434 - 1,312 \cdot C_{mean})$
Zhang e Chanson (2017)	$C = 0,5 \cdot \operatorname{erfc}\left(\frac{Y_{50} - y}{2 \cdot \sqrt{\frac{D_t \cdot (x - L_i)}{v}}}\right)$	Escoamento rapidamente variado imediatamente a jusante do ponto de início de aeração ($0 < y < \infty$).

Fonte: ZHANG e CHANSON (2017)