

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Centro de Desenvolvimento Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos



Dissertação

Efeito de Escala em Modelos Físicos Reduzidos de Vertedouros em Degraus

Bruna Moreira Sell

Pelotas, 2020

Bruna Moreira Sell

Efeito de Escala em Modelos Físicos Reduzidos de Vertedouros em Degraus

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, do Centro de Desenvolvimento Tecnológico da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos.

Orientador: Dr. Mauricio Dai Prá

Pelotas, 2020

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação na Publicação

S467e Sell, Bruna Moreira

Efeito de escala em modelos físicos reduzidos de vertedouros em degraus / Bruna Moreira Sell ; Mauricio Dai Prá, orientador. — Pelotas, 2020.

235 f.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, 2020.

1. Vertedouros escalonados. 2. Modelagem física. 3. Estruturas hidráulicas. 4. Análise adimensional. I. Dai Prá, Mauricio, orient. II. Título.

CDD : 627

Elaborada por Maria Inez Figueiredo Figas Machado CRB: 10/1612

Bruna Moreira Sell

Efeito de Escala em Modelos Físicos Reduzidos de Vertedouros em Degraus

Dissertação aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Mestre em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 27 de Fevereiro 2020.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Mauricio Dai Prá (Orientador)

Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Prof. Dr. Leonardo Contreira Pereira

Doutor em Sciences d'Environnement d'Ile de France (Université Pierre et Marie Curie – Paris 6, UPMC, França)

Pós-Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande (FURG)

Dra. Emanuele Baifus Manke

Doutora em Manejo e Conservação do Solo e da Água pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel)

Agradecimentos

Em especial à Deus, pelos privilégios que tive e por ter me dado forças nos momentos difíceis.

À Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos (PPGRH) pela oportunidade e pelos ensinamentos transmitidos ao longo do período de mestrado.

À CAPES/FAPERGS pela concessão da bolsa de mestrado durante todo o período da pesquisa.

Ao meu professor orientador Dr. Mauricio Dai Prá, exemplo de profissional, agradeço não apenas pela orientação técnica, mas pela paciência, dedicação, confiança e a amizade que construímos ao longo dos anos.

Ao grupo de pesquisa do Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pela parceria que possibilitou o desenvolvimento desta pesquisa e pela receptividade, auxílio e contribuição que agregaram a este estudo.

À minha mãe e irmãos, agradeço imensamente o amor a mim dedicado.

Ao Jaderson, pela confiança, apoio, incentivo, atenção e companheirismo durante este período.

À minha família, em especial à minha tia Laura e minha prima Andreise que me acolheram nos seus lares, com muito carinho, durante a elaboração desta dissertação.

Aos meus amigos Carla, Lukas, Jéssica, João, Marcelle, Maria, Priscila e Tamiris, e aos colegas do PPGRH que me acompanharam ao longo desta etapa.

“Se eu vi mais longe, foi por estar sobre ombros de gigantes.”
(Isaac Newton)

Resumo

SELL, Bruna Moreira. **Efeito de Escala em Modelos Físicos Reduzidos de Vertedouros em Degraus**. 2020. 235f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) - Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2020.

Vertedouros são dispositivos de segurança de barragem, integrantes do conjunto extravasor, cuja função é descarregar o excesso d'água. Devido aos danos causados pelo escoamento em contato com a estrutura de jusante das barragens, na bacia de dissipação, os vertedouros convencionais de calha lisa vêm sendo substituídos por vertedouros em degraus. O principal interesse no emprego e aperfeiçoamento desta estrutura está na grande dissipação de energia provocada pelas macrorrugosidades dos degraus. As altas velocidades do escoamento, com a consequente queda na pressão, desencadeiam pressões negativas que favorecem a erosão pelos efeitos de cavitação nos degraus construídos em concreto. O presente estudo tem como objetivo identificar o efeito de escala envolvido nas cargas de pressão medidas em vertedouros em degraus, através da comparação de três modelos físicos em escala reduzida de 1:10, 1:15 e 1:30. A base metodológica experimental deste estudo usou três modelos físicos com diferentes escalas de redução de um protótipo hipotético com altura de degrau de 0,9m. Foram efetuadas medições de carga de pressão média e instantânea, por meio do uso de piezômetros e transdutores de pressão, inseridos nas quinas dos degraus, na face do patamar e do espelho. A partir dos dados coletados avaliou-se o comportamento das cargas de pressão registradas ao longo da calha, sob condição de vazão equivalente entre os modelos. A metodologia analítica administrou a posição de início de aeração e as cargas de pressão ao longo da calha, com diferentes coeficientes consolidados pela literatura, de modo a permitir a comparação entre os modelos e com outros estudos. Foram verificados os erros relacionados aos transdutores de pressão e identificadas as frequências da ocorrência dos valores de carga de pressão extremos, por meio da elaboração de curva de probabilidades de não-excedência. A partir dos resultados alcançados neste estudo foi possível identificar que existem efeitos de escala envolvidos nos dados coletados nos modelos usados neste estudo, especialmente no modelo com maior fator de escala de redução, com escala 1:30.

Palavras-chave: vertedouros escalonados; modelagem física; estruturas hidráulicas, análise adimensional.

Abstract

SELL, Bruna Moreira. **Scaling Effect in Physical Models of Stepped Spillways**. 2020. 235f. Dissertation (Master of Science in Water Resources) – Water Resources Graduate Program, Center for Technological Development, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2020.

Spillways are safety devices for dams, members of the overflow group, whose function is to discharge excess water. Due to damage observed by the flow in contact with the structure upstream of dams, in the dissipation basin, conventional chute spillways are being replaced by stepped spillways. The main interest in the usage and improvement of this structure is due to the large energy dissipation caused by the macro-roughness of the steps. The high flow speeds, along the consequent pressure drop, trigger negative pressures which favor erosion due to cavitation effects on the concrete. The present study aims to identify the scaling effect associated with the pressure loads measured in stepped spillways, through comparison of three physical models of scales 1:10, 1:15, and 1:30. The experimental methodological base used three physical models, with different reduction scales, of a hypothetical prototype with step height of 0.9m. Measurements of average and instant pressure loads were performed, through the use of piezometers and pressure transducers, inserted in the corner of the steps, on the face of the landing and the mirror. From the data collected, the behavior of the pressure loads registered along the chute were evaluated under the condition that the flow rate was equivalent between the models. The analytical methodology non-dimensionalized the starting aeration position and the pressure loads along the chute, with different coefficients consolidated in the literature, so that comparison between the models was possible, as well as with other studies. The errors related to the pressure transducers were verified, as well as the frequencies of occurrence of extreme pressure load values, through non-exceedance probability curves. With the results reached in this study, it was possible to identify that there are scaling effects associated with the collected data in the models used, especially in the one with the largest scaling factor, 1:30.

Keywords: stepped spillways; physical modeling; hydraulic structures; dimensionless analysis.

Lista de Figuras

Figura 1 - Limites dos regimes de escoamento como uma função do ângulo de inclinação da calha e a profundidade crítica relativa h_c/s . Fonte: Chanson et al. (2015) apud Terrier (2016)	32
Figura 2 - Skimming flow. Fonte: Boes e Hager (2003).	33
Figura 3 - Regime Skimming Flow. Fonte: Adaptado de Terrier (2016)	34
Figura 4 - Ilustração dos parâmetros utilizados nas equações da tabela 1. Fonte: Adaptado de Tozzi e Ota (2004) e Dai Prá (2004).	39
Figura 5 - Evolução da pressão ao longo da calha escalonada, na face horizontal, observada no estudo experimental de Sánchez, Pomares e Dolz (2000).	43
Figura 6 - Parâmetros básicos do escoamento. Fonte: Chanson (1999)	48
Figura 7 - Esquema vertedouro em degraus. Fonte: LOH	52
Figura 8 - Esquematização da ogiva. Fonte: LOH.....	53
Figura 9 - Vista do reservatório superior e da casa de bomba do modelo LAHE.	54
Figura 10 - Sistema de condução de água do modelo LAHE.....	54
Figura 11 - Tanque de tranquilização do modelo LAHE.	55
Figura 12 - Canal de montante do modelo LAHE.....	55
Figura 13 - Vista lateral do modelo LAHE.	56
Figura 14 - Vista geral do modelo LOH II.	57
Figura 15 - Imagem aproximada da ogiva tipo Creager do modelo LOH II, construída em acrílico.	57
Figura 16 - Modelo LOH II: a) vista lateral e b) vista frontal do vertedouro em degraus.	58

Figura 17 - Vista lateral do modelo LAHE II.	59
Figura 18 - Ogiva tipo Creager instalada no modelo LAHE II.....	59
Figura 19 - a)Transdutores de pressão utilizados no modelo LOH II; b) Quadros piezométricos construídos no LOH II.	62
Figura 20 - Esquematização da disposição das tomadas de pressão nos degraus. Fonte: Conterato (2011).	63
Figura 21 - Ponta Linimétrica instalada no centro da calha em degraus do modelo LAHE II:.....	69
Figura 22 - Esquematização das variáveis envolvidas no processo de estimativa da altura perpendicular ao pseudofundo (h_0). Fonte: LOH.....	70
Figura 23 - Exemplificação da determinação da posição de início de aeração (a) incipiente (b) total no modelo LAHE II	70
Figura 24 – Comparação do comportamento das cargas de pressão média, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	78
Figura 26 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	79
Figura 26 - Comportamento longitudinal das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 0,1%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	80
Figura 27 - Comportamento longitudinal das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 99,9%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	81

Figura 28 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	82
Figura 29 - Comparação do comportamento das flutuações de cargas de pressão, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	83
Figura 30 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 0,1%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	84
Figura 31 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 99,9%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	85
Figura 32 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	86
Figura 33 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	87
Figura 34 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 0,1%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	89
Figura 35 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 99,9%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	90

Figura 36 – Adimensional $L^*/K \times F^*$	92
Figura 37 – Adimensional $La/K \times F^*$	93
Figura 38 - Comparação da posição de início de aeração entre as os dados obtidos neste estudo com os de Sanagiotto (2003), as equações propostas por Tozzi (1992), Chanson (1994), Wood et al (1983) e dos dados de POVH (2000). Fonte: Adaptado de Sangiotto (2003).....	94
Figura 39 – Comportamento dos coeficientes de pressão médias no modelo LAHE II no (a) Patamar e (b) Espelho	96
Figura 40 - Comportamento das cargas de pressão média, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas por CP e S' no (a) Patamar e (b) Espelho.	98
Figura 41 - Comparação entre as cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S', no patamar dos modelos (a) LOH II x LAHE, (b) LAHE II x LAHE, e (c) LOH II e LAHE II	99
Figura 42 - Comparação entre as cargas de pressão médias adimensionalizadas por CP e S', obtidas no espelho dos modelos (a) LOH II x LAHE, (b) LAHE x LAHE II, e (c) LOH II e LAHE II.	101
Figura 43 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	102
Figura 44 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	104
Figura 45 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.....	105

Figura 46 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema máxima, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	107
Figura 47 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	109
Figura 48 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.	111
Figura 49 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.....	113
Figura 50 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema máximas, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.....	114
Figura 51 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	116
Figura 52 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	118
Figura 53 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	119

Figura 54 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema máximas, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	120
Figura 55 - Comportamento das cargas de pressão média no modelo LAHE II, adimensionalizados na forma de ζ e S' no (a) Patamar e (b) Espelho.	122
Figura 56 - Comportamento das cargas de pressão média, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas na forma de ζ e S' no (a) Patamar e (b) Espelho	123
Figura 57 - Comportamento das flutuações de carga de pressão, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas na forma de ζ e S' no (a) Patamar e (b) Espelho	123
Figura 58 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e L/L_a , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho	125
Figura 59 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus do modelo LAHE, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 115L/s.....	127
Figura 60 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus do modelo LAHE, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 115L/s.....	128
Figura 61 – Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus do modelo LOH II, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 27L/s.....	129
Figura 62 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus do modelo LOH II, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 27L/s.....	130

Figura 63 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus do modelo LAHE II, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 22L/s.....	132
Figura 64 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus do modelo LAHE II, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 22L/s.....	133
Figura 65 – Comparação da variação do coeficiente de pressão nos patamares, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	134
Figura 66 - Comparação da variação do coeficiente de pressão nos espelhos, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	135
Figura 67 - Comparação da variação do coeficiente de pressão nos patamares, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	136
Figura 68 - Comparação da variação do coeficiente de pressão nos espelhos, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	137
Figura 69 - Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	138
Figura 70 - Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LOH II e	

LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$139

Figura 71 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para os degraus 2 e 3, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho, respectivamente.....140

Figura 72 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para o degrau de número 5 dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ para (a) Patamar e (b) Espelho.....142

Figura 73 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para os degraus 9 e 8, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho, respectivamente.....143

Figura 74 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para os degraus 16 e 15, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho, respectivamente.....144

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Pesquisas Brasileiras elaboradas sobre vertedouros com calhas em degraus. Fonte: Adaptado de Simões (2012).....	30
Tabela 2 - Equações propostas por diversos autores para a estimativa da posição de início de aeração. Fonte: Adaptado de Sanagiotto (2003), Conterato (2014), Dai Prá et al. (2012), Matos e Meireles (2014) e Novakoski (2016).....	38
Tabela 3 - Características gerais dos modelos reduzidos LAHE, LOH II e LAHE II. .	53
Tabela 4 - Condições de ensaio executadas no modelo LAHE.....	60
Tabela 5 - Condições de ensaio executadas no modelo LOH II.....	61
Tabela 6 - Condições de ensaio executadas no modelo LAHE II.....	61
Tabela 7 - Vazões Equivalentes entre os modelos LAHE, LOH II e LAHE II	62
Tabela 8 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no espelho modelo LAHE	64
Tabela 9 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no patamar modelo LAHE	64
Tabela 10 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no espelho modelo LOH II	65
Tabela 11 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no patamar modelo LOH II	66
Tabela 12 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no espelho modelo LAHE II	67
Tabela 13- Configuração da instalação de transdutores de pressão no patamar modelo LAHE II	67

Tabela 14 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos patamares do modelo LAHE, para as vazões de 115L/s e de 316L/s.	127
Tabela 15 - Variação do coeficiente de pressão médio em função do transdutor instalado nos espelhos do modelo LAHE, para as vazões de 115L/s e de 316L/s.	128
Tabela 16 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos patamares do modelo LOH II, para as vazões de 27L/s 75L/s e de 200L/s.	130
Tabela 17 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos espelhos do modelo LOH II, para as vazões de 27L/s 75L/s e de 200L/s.	131
Tabela 18 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos patamares do modelo LAHE II, para as vazões de 22L/s 61L/s e de 162.5L/s.....	132
Tabela 19 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos espelhos do modelo LAHE II, para as vazões de 22L/s 61L/s e de 162.5L/s.....	133
Tabela 20 – Variações entre os valores de carga de pressão extremos com probabilidade de não-excedência de 0,1%, para as vazões equivalentes de $q=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q=22,3\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	145
Tabela 21 - Variações entre os valores de carga de pressão extremos com probabilidade de não-excedência de 99,9%, para as vazões equivalentes de $q=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q=23.2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	145

Lista de Abreviaturas e Siglas

CCR	Concreto Compactado a Rolo
EESC	Escola de Engenharia de São Carlos
EP	Escola Politécnica
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LAHE	Modelo I do Laboratório de Hidráulica Experimental / FURNAS
LOH II	Modelo II do Laboratório de Obras Hidráulicas / UFRGS
LAHE II	Modelo II do Laboratório de Hidráulica Experimental / FURNAS
UFPR	Universidade Federal do Paraná
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNIFACS	Universidade Salvador
USP	Universidade de São Paulo
T	Tese
D	Dissertação
M	Monografia

Lista de Símbolos

φ	inclinação da calha ($^{\circ}$)
h_c	altura crítica (m)
s	altura do degrau (m)
V'	velocidade turbulenta (m/s)
σ	tensão superficial
ρ_w	densidade de água
d_{ar}	diâmetro das bolhas de ar
U_{ar}	velocidade bolhas de ar (m/s)
α	declividade do canal ($^{\circ}$)
δ	espessura da camada limite (m)
L_a	posição de início de aeração a partir da crista da ogiva do vertedouro (m)
h_a	altura da lâmina de água no ponto de início de aeração (m)
k	altura de rugosidade do degrau (m)
F^*	número de Froude rugoso (adimensional)
h_d	altura do degrau (m)
g	aceleração da gravidade (m/s ²)
K	coeficiente de pressão (adimensional)
$\frac{P}{\gamma}$	carga de pressão (m.c.a.)
v	velocidade média do fluxo (m/s)
CP	coeficiente de pressão (adimensional)
S'	posição longitudinal (adimensional)
L	posição ao longo da calha medida a partir da crista do vertedouro (m)
λ	razão de escala
Y	altura do vertedouro (m)
l_d	patamar do degrau (m)
Y_{ogiva}	altura da ogiva (m)
dL	hipotenusa do degrau (m)
$L_{até a crista}$	comprimento da ogiva até a crista (m)
L_o	comprimento da ogiva a partir da crista (m)

L_{ogiva}	comprimento da ogiva (m)
B	largura do vertedouro (m)
N_d	número de degraus
Q_m	vazão volumétrica em escala de modelo (m^3/s)
Q_p	vazão volumétrica em escala de protótipo (m^3/s)
q_m	vazão específica em escala de modelo ($m^3/s/m$)
q_p	vazão específica em escala de protótipo ($m^3/s/m$)
FE	fundo de escala
h_o	altura perpendicular ao pseudofundo (m)
h	altura perpendicular ao plano horizontal (m)
E	energia específica (m)
E_c	energia crítica (m)
v_c	velocidade crítica (m/s)
ζ_{p_x}	adimensional de pressão (adimensional)
$Erro_{protótipo}$	erro do transdutor, em escala de protótipo (m.c.a.)

Sumário

1	Introdução	23
2	Objetivos	25
2.1	Geral	25
2.2	Específicos.....	25
3	Revisão de Literatura	26
3.1	Sistema Extravasor.....	26
3.2	Vertedouros em Degraus	28
3.2.1	Regimes de Escoamento	31
3.2.2	Dissipação de Energia	34
3.2.3	Aeração do Escoamento.....	36
3.3	Modelos Físicos de Escala Reduzida	45
4	Metodologia	52
4.1	Caracterização das Instalações Experimentais	52
4.1.1	Modelo LAHE.....	53
4.1.2	Modelo LOH II.....	56
4.1.3	Modelo LAHE II.....	58
4.2	Condições de ensaio para cada modelo	60
4.3	Aquisição de dados	62
4.4	Metodologia Analítica.....	71
4.4.1	Comportamento das cargas de pressão nos patamares e espelhos	71
4.4.2	Análise adimensional	72
4.4.3	Análise dos Erros.....	73
4.4.4	Curva de Probabilidade de Não-excedência de Pressões.....	74
5	Resultados e Discussão	76
5.1	Comportamento longitudinal das cargas de pressão	76
5.1.1	Comportamento longitudinal das cargas de pressão, entre vazões equivalentes.....	76
5.2	Análise adimensional das posições de início de aeração e das cargas de pressão	91
5.2.1	Posição de Início de Aeração	92
5.2.2	Cargas de pressão ao longo da calha	96

5.2.3 Adimensional $\zeta \times S'$	121
5.2.4 Adimensional CP x L/La.....	124
5.3 Análise dos Erros relacionados aos transdutores de pressão	126
5.3.1 Modelo LAHE.....	126
5.3.2 Modelo LOH II.....	128
5.3.3 Modelo LAHE II.....	131
5.3.4 Vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	133
5.3.5 Vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	136
5.3.6 Vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$	138
5.4 Curva de Probabilidade de Não-Excedência de Pressões	139
6 Conclusões	147
Referências	150
Apêndices	159
Anexos	204

1 Introdução

Barragens são estruturas hidráulicas projetadas para reservar volumes de água, destinados aos mais diversos fins. Sob o viés social, as barragens têm importante função, pois permitem que as necessidades de acesso à água e energia, mesmo em épocas de estiagem, possam ser atendidas. Tais estruturas hidráulicas propiciam o desenvolvimento regional, com a possibilidade de emprego e geração de renda a produtores rurais e indústrias; favorecem a infraestrutura através da regularização de trechos não navegáveis naturalmente; além de reduzir os danos provocados por enchentes e inundações.

Vertedouros são dispositivos de segurança de barragem, integrantes do sistema extravasor, que visam permitir a passagem de cheias e conservar o nível de água no reservatório. Os vertedouros são utilizados em condições de eventos críticos de cheia, descarregando o excesso de água. Ao escoar sobre a estrutura, o escoamento adquire altas velocidades e impacta bruscamente na bacia de dissipação. Os danos causados na colisão da massa d'água com a estrutura a jusante da barragem podem ser catastróficos, podendo levar até ao colapso da barragem através da erosão provocada em suas fundações (MORAES, 2007).

Para mitigar os esforços causados pela energia cinética do escoamento em contato com a bacia de dissipação, nos vertedouros convencionais (de calha lisa) é comum haver a inserção de uma estrutura dissipativa, como por exemplo, os defletores salto de esqui ou uma bacia de dissipação por ressalto hidráulico. Uma técnica que vem sendo amplamente empregada para contornar essa problemática é a construção de vertedouros em degraus.

Vertedouros em degraus ou escalonados se popularizaram no meio técnico e passaram a ser largamente usados na construção de barragens devido ao advento da tecnologia do concreto compactado a rolo (CCR). Além da facilidade construtiva, agilidade e redução de custos, a dissipação de energia provocada pela macrorrugosidade proporcionada pelos degraus é o maior atrativo dessa estrutura.

Conterato (2011) ressalta que a construção de vertedouro em degraus ao longo do perfil da calha possibilita maior dissipação de energia do escoamento durante a queda em relação a um vertedouro convencional, além de permitir a diminuição das dimensões da estrutura da bacia de dissipação. Tal afirmativa corrobora com a apresentada por Simões, Porto e Schulz (2009) e Osmar (2016).

Apesar dos vertedouros em degraus permitirem alta dissipação de energia, muitos estudos indicam a ocorrência de processos erosivos pelos efeitos de abrasão e/ou cavitação no concreto. A cavitação está associada às altas velocidades do escoamento que provocam quedas na pressão, e consequentemente, esforços de tração. As extremidades externas dos degraus são indicadas como aquelas mais críticas. Desta forma, torna-se necessário conhecer as pressões que atuam ao longo do perfil da calha escalonada do vertedouro, bem como as pressões que atuam nas extremidades dos degraus e correlaciona-las com os aspectos de resistência do concreto.

Como na grande maioria dos estudos destinados a avaliar estes parâmetros são utilizados modelos físicos de escala reduzida, torna-se imprescindível determinar critérios que atestem sua veracidade, através da análise dos efeitos de escala, possivelmente envolvidos.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D ANÁLISE DA MACROTURBULÊNCIA EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS COM AERAÇÃO FORÇADA (PRÉ-AERAÇÃO), em atendimento às disposições da Lei nº 9.991, de 24 de julho de 2000, firmado entre a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e Eletrobrás-Furnas.

2 Objetivos

2.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa é identificar o efeito de escala envolvido nas cargas de pressão medidas em vertedouros em degraus, através da comparação de três modelos físicos em escala reduzida de 1:10, 1:15 e 1:30.

2.2 Específicos

- Caracterizar o comportamento das cargas de pressão ao longo da calha em degraus, em escala de protótipo, obtidos nos modelos LAHE - escala 1:10, LOH II - escala 1:15, e LAHE II - escala 1:30;
- Verificar os valores de pressão com diferentes probabilidades de não-excedência ($P_{x\%}$) junto à calha escalonada dos modelos reduzidos (LAHE, LOH II e LAHE II), em escala de protótipo;
- Comparar os dados obtidos entre os diferentes modelos físicos de escala reduzida, com vazões equivalentes em escala de protótipo;
- Determinar relações adimensionais, de modo a generalizar a aplicação dos resultados obtidos neste estudo, tanto para posições de início de aeração do escoamento quanto para cargas de pressão;
- Identificar a frequência da ocorrência dos valores de carga de pressão extremos por meio da elaboração de curva de probabilidades de não-excedência;
- Estabelecer, caso possível, indicativo de valor limite para o fator de escala a ser empregado na construção de modelos físicos reduzidos de vertedouros em degraus.

3 Revisão de Literatura

3.1 Sistema Extravasor

A concepção de uma obra hidráulica com o objetivo de armazenar água requer a presença de um extravasor de forma a permitir a passagem de água em excesso no reservatório para jusante (ARAUZ, 2005).

Arauz (2005) aponta que a escolha de um conjunto extravasor depende do local onde será implantado, podendo apresentar inúmeras configurações para as diferentes partes que compõe o conjunto para uma mesma obra, devendo ser escolhido para cada caso, o conjunto mais adequado sob o ponto de vista hidráulico e econômico.

Porto (2006) enfatiza que, em obras projetadas para o controle de vazões, além das considerações hidráulicas, deve-se avaliar igualmente o efeito da estabilidade estrutural da obra, as características do subsolo, a topografia e o tipo de barragem. Piasentin (2013) complementa que o projeto do sistema extravasor de uma barragem envolve cálculos hidrológicos e hidráulicos, e muitas vezes ensaios em modelo reduzido.

O sistema extravasor é o conjunto dos dispositivos responsáveis pela segurança em barragens, garantindo sua integridade frente as águas excedentes. Segundo Turella (2010) um sistema extravasor pode compreender vertedouro, dissipador de energia, canais de aproximação, de fuga e de descarga.

O extravasor é um dos itens de segurança da barragem, pois ele descarrega as maiores cheias sem prejudicar a própria barragem ou qualquer uma das estruturas auxiliares, além de permitir que se mantenha o nível das águas no reservatório abaixo de certo nível máximo definido no projeto (ROSELLI, 2012).

De acordo com Porto (2006), vertedouro ou descarregador é o dispositivo utilizado para medir e/ou controlar a vazão em escoamento por um canal. O autor elenca diversas maneiras de como os vertedouros podem ser classificados:

- Quanto à forma geométrica da abertura: retangulares, triangulares, trapezoidais, circulares, parabólicos;

- Quanto à altura relativa da soleira: descarga livre e descarga submersa;
- Quanto à natureza da parede: parede delgada e espessa;
- Quanto à largura relativa da soleira: sem contrações laterais e com contrações laterais;
- Quanto à natureza da lâmina: lâmina livre, lâmina deprimida, lâmina aderente;
- Quanto à inclinação do paramento da estrutura com a vertical: vertical ou inclinado; e,
- Quanto à geometria da crista: crista retilínea, circular e poligonal ou em labirinto.

Outro modo de classificação dos vertedouros é apresentado por Baptista e Lara (2010), que adotam critérios quanto:

- Aos materiais constituintes: os vertedouros são usualmente executados em concreto, utilizando-se também, em algumas obras gabiões, alvenaria, aço e madeira;
- À localização: implantados no próprio corpo da barragem ou de forma totalmente independente;
- Às condições de operação: classificados em vertedouros de serviço ou de emergência; e,
- Às condições de funcionamento: com controle ou sem controle, de acordo com a presença ou não de comportas.

Como ressalta Conterato (2014), a finalidade dos vertedouros, independente da geometria adotada, é transpor o escoamento para o leito natural de maneira segura, com a menor parcela de energia residual. A autora destaca ainda que atualmente se buscam soluções, diferentes das convencionais, de modo a aumentar a eficiência e reduzir gastos, tanto na construção quanto na manutenção das estruturas.

Uma das formas de dissipar parte da energia cinética é através da construção de degraus ao longo da calha do vertedouro, o que conduz a uma redução da energia específica residual na base do vertedouro. A dissipação de energia causada pelos degraus pode reduzir significativamente o tamanho e o custo da bacia de dissipação necessária na base do vertedouro, comparada com uma calha convencional (calha lisa) (TOZZI; OTA, 2004, p. 11).

3.2 Vertedouros em Degraus

Vertedouros em degraus são estruturas usadas desde a Antiguidade (ARANTES, 2007). Contudo, Chanson (2002) apud Simões (2008) indica que apenas no século XX os vertedouros em degraus começaram a ser projetados visando a maximização da dissipação de energia ao longo da calha, com a consequente diminuição da bacia de dissipação.

Os degraus podem ser construídos em concreto armado, gabiões, ou em rochas (SIMÕES, 2012 e SOUZA, 2015). Entretanto, como aponta Borja (2009), a técnica do concreto compactado a rolo (CCR), empregada na execução de barragens, é a grande facilitadora da construção de vertedouros com calha em degraus. Segundo Arantes (2007), o crescimento do interesse na construção de vertedouros em degraus está condicionado a esta técnica. Contretato (2014) acrescenta que a forma do processo de lançamento do CCR facilita o acabamento da superfície em degraus e gera economia na obra, além de provocar uma significativa dissipação de energia, causada pela macrorugosidade proporcionada pelos degraus.

Para Boes e Hager (2003) a popularização e o interesse por parte de pesquisadores e engenheiros em vertedouros escalonados, observado nas últimas décadas, está relacionado aos avanços tecnológicos do concreto compactado a rolo (CCR). Dentre as vantagens apontadas pelos autores está o desempenho construtivo, a economia e agilidade da construção; sendo o principal atrativo, em comparação com vertedouros de calhas convencionais, a significativa dissipação de energia ao longo da calha provocada pela macrorrugosidade dos degraus, que por consequência reduz a dimensão da bacia de dissipação, no pé do vertedouro. Simões (2012) concorda com os autores ao reafirmar os benefícios apontados.

Conforme Andriolo (2015), o uso do CCR em barragens brasileiras começou no ano 1976. Desde então, um conjunto de esforços, compreendendo ensaios e pesquisas desenvolvidas por agências governamentais, laboratórios, projetistas e construtores foram responsáveis por avaliar e adequar as inovações e tendências desta técnica no decorrer dos anos.

Um levantamento feito por Andriolo (2015) detectou que no Brasil havia mais do que 145 barragens de CCR concluídas e em construção. Dentre estas, o autor não quantificou quantas possuem vertedouro escalonado.

Em contrapartida, uma investigação realizada anteriormente por Simões (2012), identificou que dentre 50 barragens brasileiras construídas em concreto compactado a rolo, listadas em seu levantamento, pelo menos 24 possuem vertedouro em degraus.

Conforme Tozzi e Ota (2004) o desempenho hidráulico dos vertedouros em degraus despertou o interesse de laboratórios do mundo todo, que realizam, predominantemente, estudos em modelos reduzidos. Os autores destacam que o intuito das atuais pesquisas se concentra na caracterização do fluxo, na energia residual no pé do vertedouro, na concentração de ar no escoamento e nas condições de pressão junto aos degraus. Contudo, ressaltam a restrição na aplicação dos resultados até então obtidos, apontando a uma necessidade de critérios gerais de dimensionamento deste tipo de estrutura.

As primeiras pesquisas desenvolvidas no âmbito nacional, direcionadas no estudo de vertedouros com calha escalonada, foram realizadas nas instituições USP, UFPR, UFRGS e UNIFACS, como mostra a tabela 1, e por esta razão são apontadas por Simões (2012) como as precursoras do desenvolvimento do conhecimento.

Tabela 1 - Pesquisas Brasileiras elaboradas sobre vertedouros com calhas em degraus. Fonte: Adaptado de Simões (2012).

Autor(a) - 1 Orientador - 2	Ano	Instituição	Declividade	Caráter do Trabalho	Tipo
1 1 - Marcos José Tozzi 2-Giorgio Brighetti	1992	USP/EP	1V:0,75H; 1V:2,0H; 1V:6,69H	Experimental	T
2 1 - Winston H. Kanashiro 2- Podalyro Amaral de Souza	1995	USP/EP	1V:0,75H	Experimental	T
3 1- Paulo Henrique Povh 2 - Marcos José Tozzi	2000	UFPR	1V:0,75H	Experimental	D
4 1- Julio Cesar Olinger 2- Giorgio Brighetti	2001	USP/EP	1V:0,75H	Experimental	T
5 1- Daniela Guzzon Sanagiotto 2- Marcelo Giulian Marques	2003	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	D
6 1- Mauricio Dai Prá 2- Marcelo Giulian Marques	2004	UFRGS	1V:1H	Experimental	D
7 1- Jaime Federici Gomes 2- Marcelo Giulian Marques	2006	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	T
8 1- André Luiz Andrade Simões 2- Michel Sahade Darzé	2006	UNIFACS	-	Teórico	M
9 1- Eudes José Arantes 2- Rodrigo de Melo Porto	2007	USP/EESC	1V:0,75H	Numérico	T
10 1- André Luiz Andrade Simões 2- Rodrigo de Melo Porto	2008	USP/EESC	-	Teórico	D
11 1- Rafael André Wiest 2- Marcelo Giulian Marques	2008	UFRGS	1V:1H	Experimental	D
12 1- João Gerdau de Borja 2- Luiz Augusto Magalhães Endres	2009	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	M
13 1- Eliane Conterato 2- Marcelo Giulian Marques	2011	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	M
14 1- André Luiz Andrade Simões 2- Harry Edmar Schulz	2012	USP/EESC	1V:1H	Experimental	T
15 1- Raquel Jahara Lobosco 2- Harry Edmar Schulz	2013	USP/EESC	-	Teórico- Numérico	T
16 1- Eliane Conterato 2- Marcelo Giulian Marques	2014	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	D
17 1- Carolina Kuhn Novakoski 2- Eder Daniel Teixeira	2016	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	D
18 1- Carolina Kuhn Novakoski 2- Eder Daniel Teixeira	2016	UFRGS	1V:0,75H	Experimental	D

Legenda: USP= Universidade Federal de São Paulo; EP= Escola Politécnica; EESC=Escola de Engenharia de São Carlos; UFPR= Universidade Federal do Paraná; UFRGS= universidade Federal do Rio Grande do Sul; UNIFACS= Universidade Salvador; T= tese; D= dissertação; M= monografia.

3.2.1 Regimes de Escoamento

A compreensão do sistema hidráulico, observado em calhas com degraus, não é simples; em virtude, não apenas, dos diferentes regimes de escoamento, mas principalmente devido à forte aeração da superfície livre, a turbulência de fluxo e às suas interações (CHANSON e TOOMBES, 2002, 2003, e YASUDA e CHANSON, 2003 apud GONZALEZ, TAKAHASHI e CHANSON, 2008).

O escoamento sobre vertedouros escalonados pode assumir regimes do tipo *nappe flow*, transição e *skimming* (AMADOR, SÁNCHEZ-JUNY e DOLZ, 2006). As mesmas divisões são apresentadas por Rajaratnam (1990), Essery e Horney (1978) apud Lobosco et al. (2011), e Lopes et al. (2016).

Alguns autores como Chanson (1994b e 1994a) e Sanagiotto (2003), consideram a ocorrência de apenas dois regimes: tipo *nappe flow* e *skimming flow*. Matos e Quintela (1995) citados por Dai Prá (2004) instituíram a denominação de escoamento em quedas sucessivas (*nappe flow*), e escoamento deslizante sobre turbilhões (*skimming flow*). Esta simplificação pode estar relacionada a questões de cunho prático. Simões (2008) adverte que o projeto de vertedouros ou canais em degraus, deve ser elaborado de modo que o mesmo não opere submetido ao regime de transição, a menos que sejam conhecidos os esforços atuantes na estrutura por meio de um rigoroso estudo experimental e/ou numérico.

Uma sugestão de limitação entre regimes, apresentada por Chanson et al. (2015) apud Terrier (2016) é retratada na Figura 1. A limitação entre os regimes de escoamento apresentada pelos autores, relaciona o ângulo de inclinação da calha (φ) e a vazão unitária, representada pela razão da profundidade crítica e a altura do degrau (h_c/s).

Boes e Hager (2003) também delimitaram os regimes de escoamento de vertedouros escalonados, reunindo dados experimentais, equações empíricas e teóricas de diversos autores, seguindo os mesmos parâmetros utilizados por Chanson et al. (2015) para a representação gráfica de limites de ocorrência dos regimes de escoamento. Todavia, Lobosco (2013) adverte que a melhor quantificação dos limites entre os diferentes regimes ainda é motivo de questionamento na literatura.

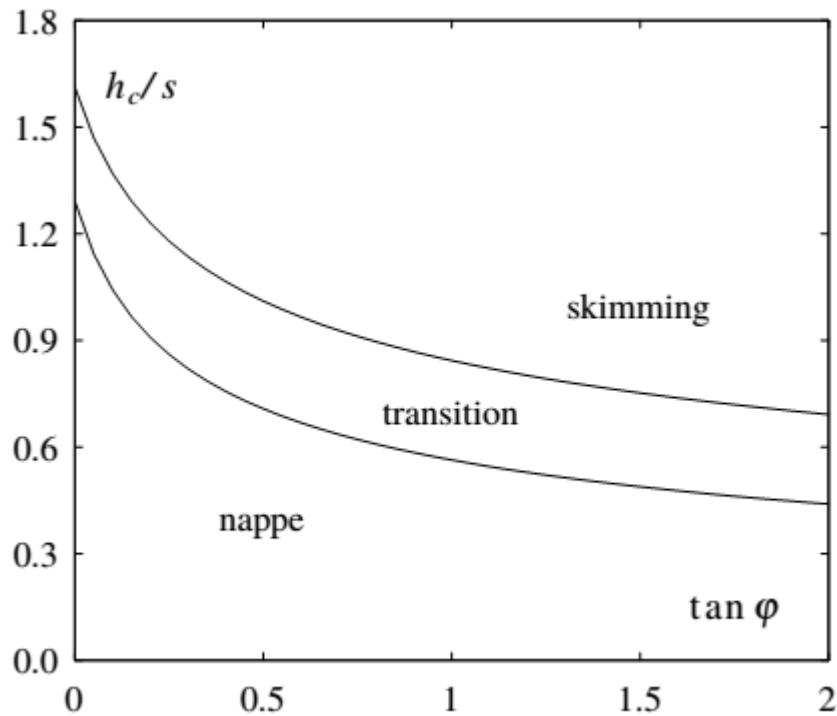


Figura 1 - Limites dos regimes de escoamento como uma função do ângulo de inclinação da calha e a profundidade crítica relativa h_c/s . Fonte: Chanson et al. (2015) apud Terrier (2016)

A seguir serão apresentadas, de forma detalhada, as características do escoamento deslizante sobre turbilhões, tendo em vista ser este o escoamento abordado neste estudo.

No *skimming flow*, de acordo com Arantes (2007), o escoamento de um degrau ao outro se comporta de forma coesa, deslizando sobre os degraus em um pseudofundo, formado pelas bordas externas, que liga os vértices superiores dos degraus. A mesma definição é encontrada em Aras e Berkun (2010); Amador, Sánchez-Juny e Dolz (2006), e Boes e Hager (2003).

Este regime ocorre, em geral, para vertedouros com calhas de maiores declividades e vazões específicas (SANAGIOTTO e MARQUES, 2008). As maiores capacidades de descarga também são associadas a este regime de escoamento por Chanson e Toombes (2002) e Lobosco et al. (2011).

Como o escoamento ocorre de forma coesa, abaixo do pseudofundo vórtices recirculantes se desenvolvem, preenchendo a zona entre o fluxo principal e os degraus (ARAS e BERKUN, 2010). Esses vórtices são mantidos através da transmissão da tensão de cisalhamento do escoamento que passa pelos vértices dos degraus (CHANSON, 1994b).

Conforme Rajartnam (1990) apud Souza (2015), a dissipação de energia no regime deslizante sobre turbilhões é ocasionada pela recirculação do fluido, onde os degraus tem a função de aplicar uma espécie de rugosidade ao escoamento.

Segundo Chafi, Hazzad e Seddini (2010) o *skimming flow* é caracterizado por uma submersão completa dos degraus que formam a calha do vertedouro. Para pequenos degraus e grandes vazões, a água geralmente passa por cima das bordas dos degraus e zonas de recirculação se desenvolvem nos nichos triangulares formados pelas faces e o pseudofundo (BOES e HAGER 2003). A figura 2 demonstra o fenômeno de modo detalhado.

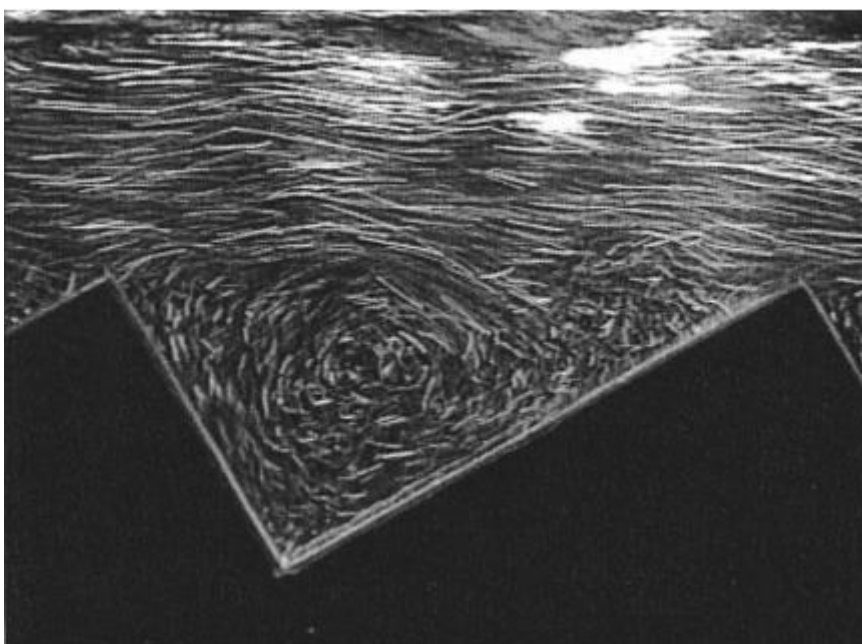


Figura 2 - Skimming flow. Fonte: Boes e Hager (2003).

O fluxo ao longo da calha pode ser dividido em regiões distintas, como mostra a Figura 3. De acordo com Amador (2005), no estágio de fluxo inicial não há incorporação de ar, a superfície do escoamento é lisa e transparente e a camada limite se desenvolve ao longo da calha, em direção à superfície livre.

No ponto em que a camada limite atinge a superfície, a turbulência natural do escoamento induz a autoaeração do fluxo, formando o chamado ponto de início de aeração (LOPES et al., 2016). Logo, intensas perturbações são verificadas na superfície livre (CHANSON 1994b).

A jusante do ponto de incipiência de entrada de ar, o fluxo passa a ser rapidamente aerado (CHANSON, 1994b). Após esse ponto, no qual o

escoamento é gradualmente variado, o escoamento torna-se aerado com nível uniforme (TOZZI, 1992; MATOS, 1999 apud CONTERATO, 2014), onde atinge equilíbrio de suas propriedades (LOPES et al., 2016).

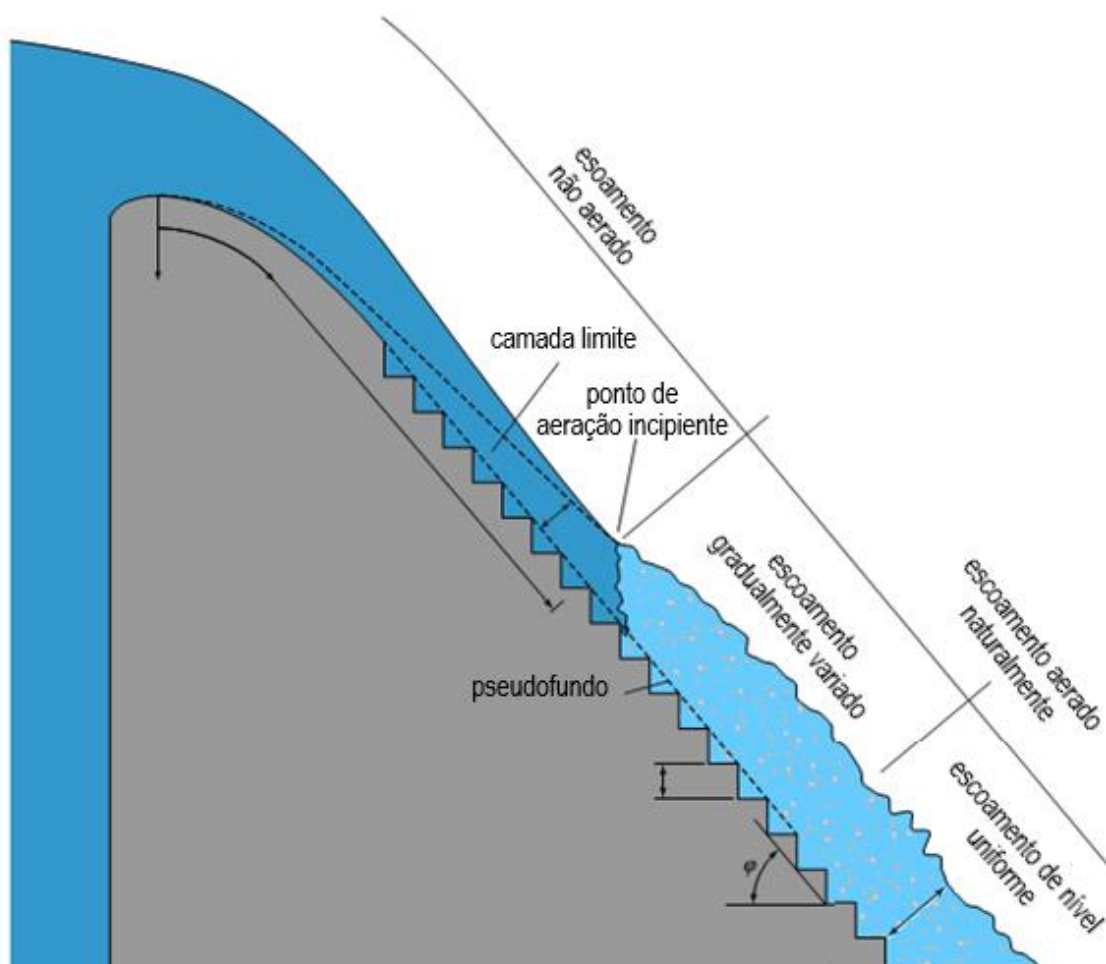


Figura 3 - Regime Skimming Flow. Fonte: Adaptado de Terrier (2016)

3.2.2 Dissipação de Energia

Os problemas hidráulicos da dissipação de energia na própria estrutura e na restituição a jusante já causaram danos em muitas obras e exigem um projeto apurado e ensaios em modelo (PIASENDIN, 2013).

Sanagiotto et al. (2003) apontam que diversos estudos têm se dedicado a investigar critérios para o dimensionamento e avaliação da dissipação de energia ao longo do paramento em degraus de vertedouros. Neste contexto, destacam-se as pesquisas desenvolvidas por Wiest (2008), Borja (2009), Dai Prá (2011), Conterato (2014) Novakoski (2016) e Pinto (2017).

De acordo com Neidert (1980), a dissipação de energia ao longo de transposições de nível, onde o percurso do escoamento é curto e sobre contornos lisos, normalmente é pequena. O autor sugere que, como exceção, em condições específicas, calhas escalonadas podem induzir ao aumento de dissipação de energia neste processo.

Dai Prá (2004) salienta que a principal função dos vertedouros em degraus é dissipação de energia ao longo da calha. Segundo o autor, a redução da energia residual no pé da barragem implica na redução dos riscos de erosão no maciço, além de proporcionar menores custos com a construção de estruturas de dissipação à jusante do vertedouro.

A técnica construtiva de vertedouros com calhas em degraus consiste em uma forma de estrutura de dissipação de energia que permite que parte da dissipação ocorra durante a queda do escoamento, de modo a minimizar a parcela de energia que chega até sua base, na bacia de dissipação. Desta forma, a associação de vertedouro em degraus com bacias de dissipação por ressalto hidráulico permite construções mais econômicas, por implicarem em estruturas de dissipação menores (GOMES, 2018).

De acordo com Conterato (2011), vários fatores interferem na dissipação de energia da calha, tais como:

- Geometria dos degraus;
- Declividade da calha;
- Tipos de escoamento;
- Aeração do escoamento.

Sorensen (1985) constatou que a energia cinética do escoamento na calha em degraus correspondia a valores entre 6 e 12% daqueles obtidos para uma calha lisa. Contudo, as condições de fluxo em uma calha escalonada são caracterizadas por um alto nível de turbulência (ARAS e BERKUN, 2010).

Segundo Sanagiotto (2003) a dissipação de energia em escoamentos aerados é muito mais significativa do que em escoamentos não aerados. Em escoamentos aerados sobre vertedouros em degraus os níveis de dissipação de energia, em relação a um vertedouro de calha lisa, variam de 45 a 94%, equivalendo a valores de energia residual entre 55 e 6%, respectivamente. A

autora concluiu também que degraus maiores dissipam mais energia, e que há um decréscimo com o aumento da vazão.

André, Ramos e Matos (2004) apontam que, após ensaios experimentais em um descarregador em degraus, a perda de carga do escoamento deslizante sobre turbilhões é de duas a cinco vezes maior do que a obtida em descarregadores com soleira lisa. Os autores complementam ainda que, para este tipo de estrutura, a perda de carga aumenta ligeiramente com a altura dos degraus.

Todavia, Simões (2008) ressalta que, para vazões específicas elevadas, a dissipação de energia passa a ser menos significativa e o risco potencial da ocorrência de cavitação ao longo dos degraus aumenta.

Em contrapartida, as altas velocidades e acentuadas declividades do escoamento levam à incorporação de ar na superfície livre, processo chamado de autoaeração (CHANSON, 1993). Esse fenômeno tem sido amplamente estudado, a fim de definir critérios para o dimensionamento de estruturas específicas em que isto ocorra, seja de forma natural ou induzida (SANAGIOTTO et al. , 2003).

3.2.3 Aeração do Escoamento

A incorporação de ar é causada pela ação da forte turbulência observada próxima a superfície livre. Através desta interface, o ar é continuamente capturado e liberado ao longo do escoamento. A incorporação de ar ocorre quando a energia cinética é grande e turbulenta o suficiente para superar a tensão superficial e os efeitos da gravidade (ARAS E BERKUN, 2010).

Em fluxos supercríticos sobre calhas de vertedouros, a quantidade de ar incorporado é um importante parâmetro de projeto (CHANSON, 1993). Chanson e Toombes (2002) apontam que apenas na Universidade de Queensland, pesquisas realizadas por Chanson and Toombes (1997, 2000), Tozzi et al. (1998), Chamani e Rajaratnam (1999), Matos (2000), Toombes e Chanson (2000), Boes (2000), Ohtsu et al. (2000), se dedicaram a detalhar, através de investigações experimentais, a incorporação de ar em calhas escalonadas.

Aras e Berkun (2010) mencionam que em vertedouros escalonados com regime tipo *skimming flow*, a região de incorporação de ar é caracterizada pela turbulência do escoamento que gera o afloramento da camada limite, até a mesma atingir a superfície.

Chanson (1993) indica uma formulação matemática que determina a ocorrência de incorporação de ar, ao satisfazer a equação 1 (derivada de Ervine e Falvey, 1987) e a equação 2:

$$V' > \sqrt{\frac{8 \cdot \sigma}{\rho_w \cdot d_{ar}}} \quad \text{Equação (1)}$$

$$V' > U_{ar} \cdot \cos \alpha \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

V' - velocidade turbulenta;

σ - tensão superficial;

ρ_w - densidade de água;

d_{ar} – diâmetro das bolhas de ar;

U_{ar} - velocidade bolhas de ar;

α - declividade do canal;

Contudo, dada a dificuldade em determinar o parâmetro diâmetro das bolhas de ar, outras formas de estimativa da ocorrência de incorporação de ar foram propostas.

A tabela 2 apresenta, de forma resumida, as proposições teóricas e experimentais, sugeridas por alguns autores, através de medições em modelos de vertedouros em degraus, acerca da posição de início de aeração e da altura de lâmina de água no início da aeração. Destaca-se que os estudos de Campbell et al. (1965) e Wood et al. (1983) foram realizados com calha lisa.

Tabela 2 - Equações propostas por diversos autores para a estimativa da posição de início de aeração. Fonte: Adaptado de Sanagiotto (2003), Conterato (2014), Dai Prá et al. (2012), Matos e Meireles (2014) e Novakoski (2016)

Autor	Declividade	Formulações Matemáticas	
Campbell et al. (1965) Tozzi (1993)	Calha Lisa 53,13°	$\frac{\delta}{L_a} = 0,08 \left(\frac{L_a}{K} \right)^{-0,233}$	Equação (3)
Wood et al. (1983)	Calha Lisa	$\frac{L_a}{k} = 13,6(\sin \alpha)^{0,0796} F^{*0,713}$	Equação (4)
Chanson (1994)	27° a 52°	$\frac{L_a}{k} = 9,8(\sin \alpha)^{0,08} F^{*0,71}$ $\frac{h_a}{k} = \frac{0,40}{(\sin \alpha)^{0,04}} F^{*0,64}$	Equação (5)
Matos (1999)	53,13°	$\frac{L_a}{k} = 6,289 F^{*0,734}$ $\frac{h_a}{k} = 0,361 F^{*0,606}$	Equação (6)
Chanson e Toombes (2002)	21,8°	$\frac{L_a}{k} = F^{*0,465} \frac{12,34}{(\sin \alpha)^{0,0796}}$	Equação (7)
Sanagiotto (2003)	53,13°	$\frac{L_a}{k} = 9,7721 F^{*0,7014}$ $\frac{h_a}{k} = 0,3965 F^{*0,5975}$	Equação (8)
Amador (2005)	51,3°	$\frac{L_a}{k} = 5,982 F^{*0,840}$ $\frac{h_a}{k} = 0,385 F^{*0,580}$	Equação (9)
Conterato (2011)	53,13°	$\frac{L_a}{k} = 12 F^{\frac{2}{3}}$ $\frac{h_a}{k} = \frac{1}{3} F^{*\left(\frac{2}{3}\right)}$	Equação (10)
Meireles et al. (2012)	53°	$\frac{L_a}{k} = 6,75 F^{*0,76}$ $\frac{h_a}{k} = 0,35 F^{*0,59}$	Equação (11)

Onde:

δ – espessura da camada limite (m);

L_a – posição de início de aeração a partir da crista ou início da ogiva do vertedouro (m);

h_a – altura da lâmina de água no ponto de início de aeração (m);

k – altura de rugosidade do degrau (m) – equação 12 de Tozzi (1992) apud Dai Prá (2004); Lobosco (2013) e Sanagiotto (2003);

F^* - número de Froude rugoso, conforme equação 13 de Wood et al. (1983) apud Conterato (2014) e Sanagiotto (2003) (adimensional)

$$k = h_d(\cos \alpha) \quad \text{Equação 12}$$

$$F^* = \frac{q}{\sqrt{(g \sin \alpha K^3)}} \quad \text{Equação 13}$$

Onde:

k – altura da rugosidade do degrau (m);

h_d - altura do degrau (m);

α – declividade da calha ($^\circ$);

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

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

g – aceleração da gravidade (m/s^2).

A Figura 4 ilustra, esquematicamente, a identificação dos termos observados nas equações da tabela 2.

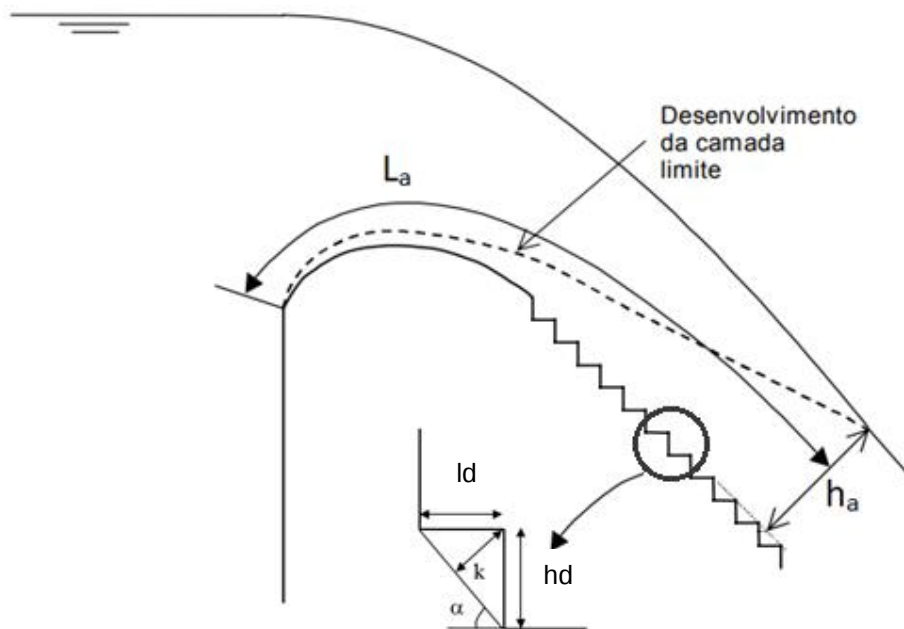


Figura 4 - Ilustração dos parâmetros utilizados nas equações da tabela 1. Fonte: Adaptado de Tozzi e Ota (2004) e Dai Prá (2004).

Lobosco (2013) avalia que o desenvolvimento da camada limite é muito importante no controle da cavitação, pois seu afloramento coincide com a

origem da aeração do escoamento. Em adendo, o autor destaca que a posição de início de aeração no escoamento varia com a vazão, deslocando-se para a jusante à medida que a vazão aumenta.

Tozzi e Brighetti (1994) referenciados por Tozzi e Ota (2004) mostraram que, para uma calha escalonada com declividade de $53,13^\circ$, o emprego da equação 3 permite, a partir do conhecimento da espessura da camada limite turbulenta, caracterizar a posição de início de aeração do escoamento. Onde a espessura da camada limite (δ) no ponto incipiente de fato é a profundidade do escoamento (h_a).

A intensa introdução de ar nos escoamentos sobre vertedouros escalonados reduz o potencial risco de dano por cavitação em superfícies de concreto; assim como o dano provocado pelo colapso das cavidades de vapor (USBR, 2015). Ademais, autores como Chamani e Rajaratnam (1999), bem como May (1987) e Falvey (1990) citados por Chanson (1993), e Brito (2011) compatibilizam desta concepção.

A cavitação (formação e colapso de bolhas de vapor) é um dos problemas capazes de causar danos à estrutura dos vertedouros. Por esta razão, Moraes (2007) diz que este fenômeno é pouco desejável que ocorra nos descarregadores, devido ao seu poder erosivo sobre materiais não cristalinos, como o concreto utilizado na confecção destas estruturas.

Lobosco e Schulz (2010) ressaltam que a intensidade e o tempo de atuação do fenômeno de cavitação estão diretamente relacionados com a severidade dos danos. A redução do risco de danos causados pela cavitação depende da aeração do escoamento e possui relevância quanto a estabilidade da estrutura, uma vez que a mistura ar-água amortece os efeitos oriundos do colapso das bolhas.

A aeração pode ocorrer de forma natural ou induzida, sendo que neste último caso, a introdução do ar tem sempre como objetivo principal a prevenção da ocorrência de danos por ação da cavitação (LIMA, 2003 apud BRITO, 2011).

Entre as várias medidas de proteção dos vertedouros em degraus, Wu e Luo (2011) enfatizam que a introdução de ar em vertedouros de barragens é uma técnica simples e economicamente viável para evitar os danos causados

pelo fenômeno da cavitação. Os autores sugerem que ao atingir a concentração de ar em 3-5% no fluxo, os danos podem ser efetivamente reduzidos.

Segundo Simões (2012), prever informações sobre o comportamento das variáveis envolvidas no campo de pressões pode indicar a possibilidade de ocorrência de mudança de fase da água e consequentes danos ocasionados pela cavitação. Gomes (2006) inclui que, do ponto de vista do estudo de pressões, é importante formular um critério que possibilite a associação entre a aeração do escoamento e os esforços observados.

3.2.3.1 Pressões Atuantes

Poucas diretrizes de projeto para vertedouros escalonados estão disponíveis até o momento (BOES e HAGER, 2003). Osmar (2016) aponta para a necessidade de serem realizados estudos mais aprofundados sobre a ação do escoamento nos vertedouros em degraus, incluindo a análise das pressões e dos esforços resultantes.

Uma das técnicas relativas às obtenções de esforços hidrodinâmicos em contornos sólidos em estruturas hidráulicas está associada a medições de pressões pontuais através de orifícios junto à soleira (GOMES, 2006). Neste sentido, Lopardo (1986), Toso e Bowers (1988), e Fiorotto e Rinaldo (1991) indicados por Gomes (2006) relatam que as experiências acumuladas nos estudos em bacia de dissipação por ressalto hidráulico baseados nessa técnica têm provido orientações úteis na compreensão de flutuações de pressão em escoamentos macroturbulentos bifásicos.

Em nível mundial, poucos trabalhos foram focados numa investigação detalhada da caracterização dos esforços hidrodinâmicos observados em vertedouros escalonados. Neste seguimento, destacam-se os estudos realizados por Sanagiotto (2003); Dai Prá (2004); Tozzi e Ota (2004); Amador (2005); Gomes (2006); Arantes (2007); Conterato (2011); e, Lobosco et al. (2011).

O campo de pressão reflete as características locais do escoamento e, portanto, apesar de apresentar um padrão comportamental similar nos degraus, sua quantificação está diretamente associada às velocidades e à

quantidade de ar presente no escoamento, dentre outras características (GOMES 2006).

Dentre a bibliografia até então disponível nota-se um consenso na comunidade científica, indicando um padrão no comportamento do campo de pressões; especialmente quanto à posição de valores de pressões médias, máximas e mínimas, observados nos degraus.

Dai Prá et al. (2012), Conterato (2014), Gomes (2006), Lobosco e Schulz (2010), Sanagiotto (2003), identificaram que os máximos valores de pressões médias foram verificados nas tomadas mais extremas do patamar do degrau, onde ocorre maior impacto do escoamento. Já os mínimos valores médios foram verificados no espelho do degrau, nas tomadas mais próximas ao vértice externo. As maiores flutuações de pressão também estão situadas nestas posições mencionadas.

Gomes (2006) verificou que no patamar, além das pressões médias serem positivas e superiores às observadas no espelho, apresentam uma tendência de crescimento desses valores com o aumento da vazão e um decréscimo no sentido do vértice interno da cavidade do degrau.

Dai Prá et al. (2012) indicam que a presença de pressões negativas na região do espelho do degrau favorece a atuação de esforços de tração nesta face. Os autores observaram pressões negativas aumentando gradativamente com o aumento da vazão até valores positivos.

No caso particular de vertedouros em degraus, Conterato (2014) salienta que a cavitação ocorre em função das baixas pressões geradas pelo deslocamento do escoamento, atrelada às altas velocidades; sendo, portanto, a região dos vértices externos das estruturas em degraus a mais susceptível a este dano.

Com relação aos esforços mais críticos registrados ao longo da calha, Amador (2005) associa-os à região próxima ao afloramento da camada limite.

Gomes et al. (2005) mencionados em Gomes (2006) concluíram que o escoamento interno nos degraus é subdividido em duas zonas distintas: uma externa, governada pelo impacto do jato (até 40% do comprimento do patamar com origem na extremidade externa) e outra, mais interna, controlada pela recirculação dos turbilhões.

No trabalho experimental de Sánchez, Pomares e Dolz (2000), foram medidas as seguintes distribuições de pressão ao longo da calha, na face horizontal dos degraus (figura 5):

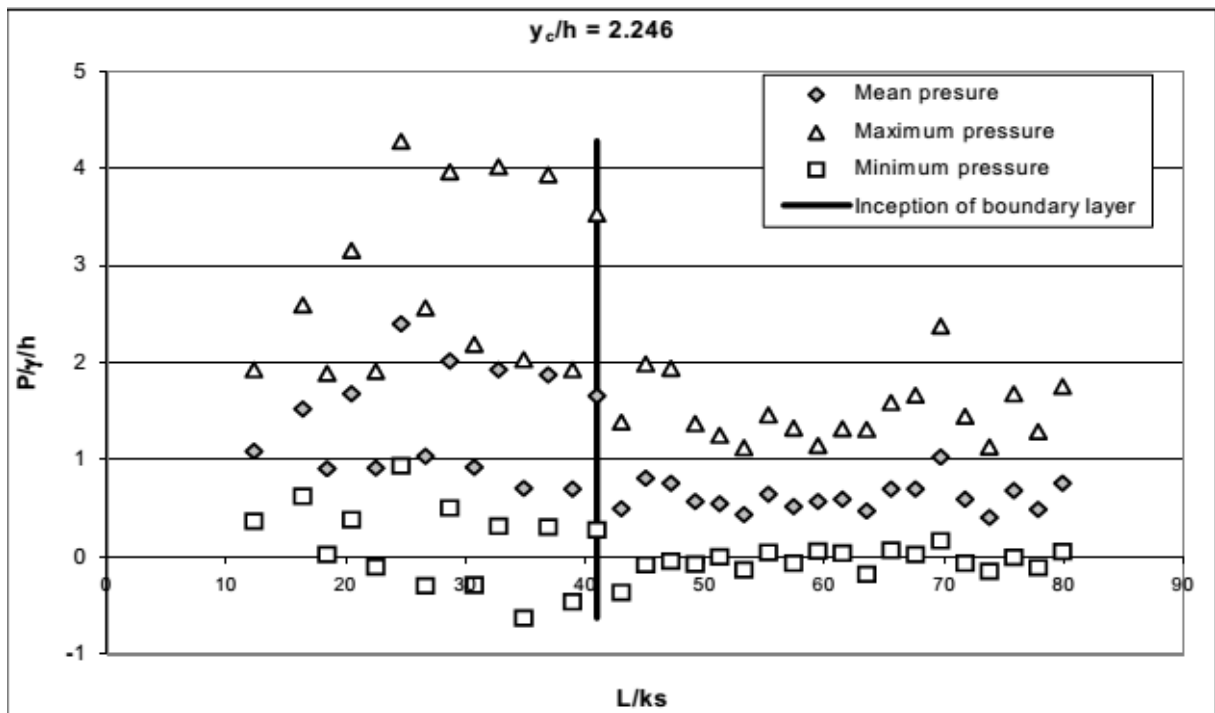


Figura 5 - Evolução da pressão ao longo da calha escalonada, na face horizontal, observada no estudo experimental de Sánchez, Pomares e Dolz (2000).

Na Figura 5, no eixo das ordenadas as cargas de pressão médias e extremas máximas e mínimas $\left(\frac{P}{\gamma}\right)$ foram adimensionalizadas pela altura vertical do degrau (h); enquanto que no eixo das abscissas o adimensional de posição (L/k_s) relacionou a distância entre o ponto de medição (L) com a rugosidade do degrau (k_s).

Sánchez, Pomares e Dolz (2000), identificaram que:

- A montante do ponto de afloramento da camada limite (onde ocorre a entrada de ar), as pressões sofrem uma variabilidade maior do que a jusante, onde o fluxo é totalmente desenvolvido.
- As pressões médias são positivas ao longo de todo o vertedouro. Apenas pressões mínimas exibem valores negativos, embora nesta situação, longe do risco de cavitação.
- As pressões máximas e mínimas estão localizadas a montante do ponto de início de afloramento da camada limite.

Segundo Conterato (2011), o estudo realizado por Tozzi (1992), analisando pressões médias e instantâneas em um vertedouro com diferentes alturas de degraus, com declividade de 53,3°, verificou a ocorrência de pressões negativas nos espelhos de alguns degraus, na ordem de -0,55m.c.a. no modelo, indicando risco de cavitação. O autor propôs uma equação para adimensionalizar as pressões médias em função da energia cinética do escoamento, conforme equação 14.

$$K = \frac{\frac{P}{\gamma}}{\frac{v^2}{2g}} \quad \text{Equação (14)}$$

Onde:

K – coeficiente de pressão (adimensional);

$\frac{P}{\gamma}$ – carga de pressão medida no modelo (m.c.a.);

v – velocidade média do fluxo (m/s);

g – aceleração da gravidade (m/s²).

Com o objetivo de caracterizar as pressões médias e suas flutuações, sem a dependência da velocidade média do escoamento, Amador (2005) propôs um novo adimensional de coeficiente de pressão (equação 15) que tem como função a energia cinética do fluxo incidente sobre o degrau. Nota-se que, diferentemente daquele proposto por Tozzi (1992), o coeficiente de pressão CP de Amador (2005) estima a velocidade média através da profundidade de água na seção.

$$CP = \frac{\frac{P}{\gamma}}{\frac{v^2}{2g}} \quad \text{Equação (15)}$$

Onde:

CP – coeficiente de pressão (adimensional);

$\frac{P}{\gamma}$ – carga de pressão que se deseja adimensionalizar (m.c.a.);

v – velocidade média do escoamento obtida através da profundidade de água na seção (m/s);

Gomes (2006), ao estudar o comportamento das pressões ao longo da calha de um vertedouro com degraus de 9cm de altura, para diferentes vazões, com declividade 1V:0,75H, ajustou modelos teórico-experimentais para prever o comportamento das pressões no espelho e no patamar baseando-se na equação 15, desenvolvida por Amador (2005). O autor aplicou conjuntamente o adimensional de posição longitudinal proposto por Mattos (1999), exposto na equação 16.

$$S' = \frac{(L - L_a)}{h_a} \quad \text{Equação (16)}$$

Onde:

S' – posição longitudinal (adimensional);

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 equivalente de água na seção de afloramento da camada limite (m).

Cabe enfatizar que as diferentes equações apresentadas na tabela 2, observadas suas limitações de aplicação, podem ser empregadas para a obtenção do adimensional de posição longitudinal (S').

3.3 Modelos Físicos de Escala Reduzida

Modelos físicos são ferramentas usadas para representar ou interpretar simplificada a realidade. Eles apresentam apenas uma visão ou um cenário de um fragmento do todo (GOMES, 2018).

Um modelo físico hidráulico representa um protótipo e é usado como uma ferramenta para encontrar soluções técnicas e otimizar economicamente os problemas da engenharia (NOVAK, 1984 apud HELLER, 2011), assim como para garantir uma operação segura da estrutura (WUTHRICH E CHANSON, 2014). Chanson (1999) acrescenta que os modelos físicos de escala reduzida têm um importante papel, pois auxiliam na tomada de decisões por

possibilitarem a visualização e compreensão antecipada do comportamento das variáveis atuantes, de modo a permitir uma seleção mais adequada do projeto.

Melo (2011) menciona que a construção de modelos físicos, em escala reduzida, embora explorada anteriormente por Arquimedes, Leonardo Da Vinci e outros estudiosos, só foi possível após a elaboração da Teoria da Semelhança e do Teorema de Bridgman. O uso de modelos hidráulicos para a solução de problemas de engenharia se tornou, desde então, um procedimento padrão aceito em muitas áreas (KOBUS, 1980 apud GOMES, 2018).

Os resultados do modelo físico reduzido devem trazer informações que, por meio de transposição de escala, possam ser extrapoladas para o protótipo em tamanho real (SOUZA, 2015). Todavia, de acordo com Heller (2011), diferenças consideráveis entre o modelo reduzido e parâmetros do protótipo podem resultar devido ao modelo, escala e/ou efeitos de medição.

Os efeitos relacionados ao modelo são atrelados por Heller (2011) a reprodução incorreta das feições do protótipo, técnicas de geração do escoamento ou ondas, ou ainda pelas propriedades do fluido. O autor indica que os efeitos de escala se originam da incapacidade de manter as razões constantes entre as forças relevantes no modelo e em seu protótipo. Enquanto que os efeitos de medição incluem o uso de técnicas não idênticas para amostragem de dados no modelo e protótipo.

Além das interferências apontadas anteriormente, ASCE (1982) apud Novak et al. (2010) acrescenta os efeitos de laboratório, incluindo nestes, as simplificações necessárias que impliquem restrições físicas na construção do modelo.

Teixeira (2008) menciona que a utilização de modelos numéricos, dados os avanços computacionais e as técnicas de modelagem, tem atraído muitos pesquisadores. No entanto, ressalta suas limitações na reprodução de fenômenos hidráulicos pelo desconhecimento das leis que os regem e da necessidade de dados para sua calibração. Heller (2011) julga que as simulações numéricas consigam considerar os efeitos do modelo, mas em contrapartida, os efeitos de medição ou de escala normalmente não podem ser incluídos.

De modo geral, os efeitos de escala para um fenômeno específico aumentam com a razão de escala (λ) ou também denominado fator de escala (NOVAK e CABELKA, 1981, HUGHES, 1993 apud HELLER, 2011). A seleção apropriada de λ é, portanto, uma otimização econômica que deve considerar os aspectos de limitação física e de cunho técnico (SANAGIOTTO, 2007)

$$\lambda = \frac{L_p}{L_M} \quad \text{Equação (17)}$$

Onde L_p é uma característica de comprimento no protótipo (subscrito p) e L_M corresponde a grandeza de comprimento no modelo (subscrito m). O inverso da equação 17 é definido como a escala 1: λ .

Chanson (1999) destaca que os efeitos de escala são geralmente pequenos, mas nem sempre são insignificantes. A condição de semelhança, entre o modelo e o protótipo, varia de acordo com o problema a ser estudado e com o grau de precisão desejado do modelo (GOMES, 2018).

A modelagem hidráulica não pode ser desassociada da teoria básica da mecânica dos fluidos. Para serem eficientes e úteis, as investigações experimentais requerem uma orientação teórica que deriva principalmente das grandezas básicas (mesmas proporções de medidas de comprimento [L_r], velocidades características [V_r] e forças [F_r]) e da teoria da semelhança (CHANSON, 1999).

$$L_r = \frac{l_p}{l_m} \quad \text{Equação (18)}$$

$$V_r = \frac{V_p}{V_m} \quad \text{Equação (19)}$$

$$F_r = \frac{F_p}{F_m} \quad \text{Equação (20)}$$

Onde os subscritos p e m referem-se a parâmetros em escala de protótipo e do modelo, respectivamente. Enquanto o subscrito r indica a proporção de quantidade de protótipo para modelo.

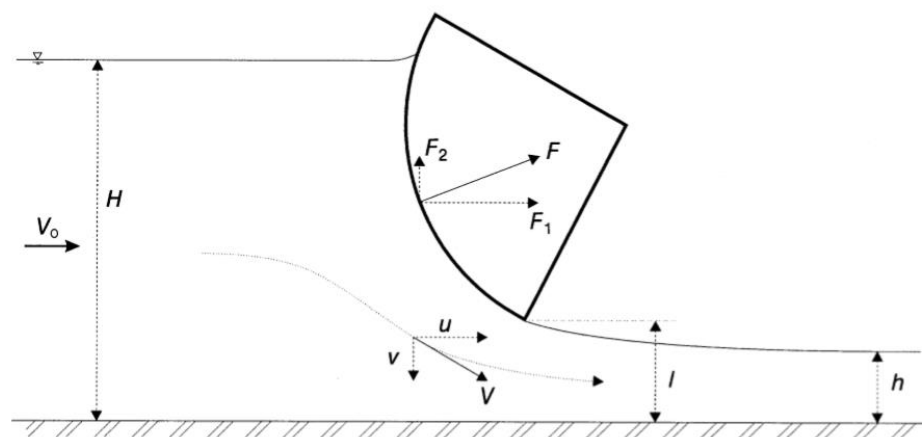


Figura 6 - Parâmetros básicos do escoamento. Fonte: Chanson (1999)

Segundo Tassinari et al. (2018) os modelos considerados completamente semelhantes são aqueles em que todas as relações de força são idênticas, onde todos os parâmetros estão em escala. Dessa forma, os autores recomendam que uma série de condições de semelhança deva ser assegurada entre modelo e protótipo, tais como:

- Semelhança geométrica
- Semelhança cinemática
- Semelhança dinâmica

A semelhança geométrica implica que as razões entre os comprimentos característicos do protótipo e os comprimentos do modelo sejam iguais (CHANSON, 1999). De modo análogo, Fox et al. (2004) referenciado em Souza (2015) alegam que a semelhança geométrica requer que protótipo e modelo sejam condizentes em suas dimensões através de um fator de escala, ou seja, a partir de um fator a altura, largura, comprimentos e raios dos modelos devem se correlacionar.

De modo semelhante, Heller (2011) define que a semelhança geométrica requer similaridade na forma, com todas as dimensões de comprimento no modelo λ vezes menor do que o protótipo. Os comprimentos, áreas e volumes do modelo, devem, portanto, ser escalonados com λ , λ^2 e λ^3 , respectivamente, em relação ao protótipo.

A semelhança cinemática, segundo Gomes (2018), se refere à semelhança do movimento entre as partículas do modelo e do protótipo. Além de implicar em semelhança geométrica, a similaridade de movimento entre

modelo e protótipo exige relações idênticas de tempo, velocidade, aceleração e vazão em todos os momentos (HELLER, 2011). Fox et al. (2004) mencionado em Souza (2015) dizem que em um dado ponto, a velocidade do escoamento deve ter a mesma direção e sentido, ou seja, a velocidade diferirá apenas em módulo, devendo ser correlacionado através de um fator de escala. Sendo assim, em ambas estruturas as linhas de corrente devem coincidir.

Para atingir a semelhança dinâmica, além da semelhança geométrica e cinemática, Heller (2011) comenta que todas as relações de forças entre as duas estruturas devem ser iguais. Para garantir essas condições, o teorema de Buckingham Pi pode ser utilizado para obter os grupos adimensionais governantes de um fenômeno do escoamento (FOX et al., 2004 apud SOUZA, 2015).

De acordo com Souza (2015) a semelhança completa entre dois escoamentos é obtida quando se consegue a igualdade entre todos os grupos adimensionais que intervêm no fenômeno. Isso obriga que se tenha igualdade entre protótipo e modelo em todos os adimensionais, como os números de Froude, Reynolds, Weber, Euler, Mach, Strouhal, entre outros (TASSINARI et al., 2018).

A força de inércia é normalmente a mais relevante na dinâmica de fluidos e é, portanto, comumente incluída em combinações de razão de forças (HELLER, 2011). Segundo Gomes (2006) os números adimensionais relacionam as forças inerciais à: a) forças gravitacionais, representado pelo número de Froude (F) – equação 21; b) forças viscosas, representado pelo número de Reynolds (Re) – equação 22; c) forças devidas a tensão superficial da água, representada pelo número de Weber (We) – equação 23; e, d) forças de caráter elásticos, representados pelo número de Cauchy (Ca) – equação 24.

Número de Froude	$F = \frac{v}{\sqrt{g \cdot L}}$	Equação (21)
------------------	----------------------------------	--------------

Número de Reynolds	$Re = \frac{L \cdot v}{\nu}$	Equação (22)
--------------------	------------------------------	--------------

Número de Weber	$We = \frac{\rho \cdot v^2 \cdot L}{\sigma}$	Equação (23)
-----------------	--	--------------

Número de Cauchy	$Ca = \frac{\rho \cdot v^2}{E}$	Equação (24)
------------------	---------------------------------	--------------

Onde:

v – velocidade média do escoamento (m^2/s);

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

L – altura do escoamento (m);

ν – viscosidade cinemática (m^2/s);

ρ – massa específica do fluido (kg/m^3);

σ – tensão superficial (m/s^2);

E – módulo de compressibilidade volumétrica (N/m^2).

Entretanto, a experiência em modelagens tem mostrado que na representação de determinados fenômenos alguns adimensionais são mais relevantes que outros. Conforme Terrier (2016), a semelhança de Froude é empregada para conduzir a elaboração de modelos com escoamento livre, por gravidade. A lei de semelhança de Froude conserva a proporção de duas forças dominantes: gravidade e inércia. No entanto, Souza (2015) ressalva que a igualdade do número de Froude entre dois escoamentos provoca a desigualdade dos outros grupos adimensionais.

Chanson (1999) observa que ao se utilizar o fluido água nos modelos físicos reduzidos, os efeitos de viscosidade, de tensão superficial e de concentração de ar observados no protótipo não são transpostos, acarretando números de Reynolds nos modelos reduzidos muito inferiores àqueles do protótipo. Neste contexto, Gomes (2006) sobressai à impossibilidade prática de preservar todas essas relações de forças atuantes no estudo de fenômenos macroturbulentos, fato que ilustra a dificuldade em se avaliar efeitos de escalas sem medições comparativas em protótipo.

Chanson (2008) aponta que a validade da semelhança de Froude para calhas escalonadas foi testada e que alguns estudos produziram condições para minimizar os efeitos de escala, porém sugerindo a impossibilidade de alcançar a similaridade dinâmica, mesmo em modelos de grande porte. De modo geral, Chanson (2000) atribuiu efeitos de escala significativos em modelos de vertedouros escalonados em que o fator de escala geométrico do protótipo fosse de 10 a 20 vezes maior do que o modelo.

Amador (2005) investigou o efeito de escala envolvido na análise das pressões atuantes nos degraus de um vertedouro escalonado. O protótipo de referência possuía degraus com 0,9m de altura, sendo este reproduzido em três modelos com escalas de 18, 12,9 e 9, equivalentes a degraus com altura de, respectivamente, 5, 7 e 10cm. O autor concluiu que não se evidenciou efeitos de escala relevantes no campo de pressões nos degraus. Frente a isto, considerou que a semelhança de Froude é válida para modelar as pressões médias e as flutuações de pressão sobre os degraus na zona aerada e na não aerada, desde que se assegurem números de Reynolds (Re) suficientemente altos (10^5). Ressalva-se, no entanto, que as flutuações de pressão têm mostrado um comportamento sensível e distinto de acordo com a escala do modelo, com uma tendência a observar maiores flutuações de pressão quanto menor o tamanho do modelo.

Dentre os vários estudos já realizados em modelos reduzidos de vertedouros em degraus, o trabalho de Matos e Quintela (1995) sugeriu um conceito relevante na orientação da dimensão de degrau ótima. Os autores, conforme consta em Gomes (2006), sugeriram um valor mínimo de altura de degrau que maximiza a dissipação de energia e que de modo secundário auxilia estudos em modelos reduzidos a, independentemente da escala do modelo, empregar alturas de degraus, em escala de protótipo, na faixa usual da ordem de 0,3m, 0,6m, 0,9m.

No segmento da hidráulica dos vertedouros em degraus, Chanson (2008) ressalta que apesar da ativa produção científica observada nas últimas três décadas, questões fundamentais de similaridade dinâmica e efeitos de escala raramente foram discutidas. Assim, o presente estudo se propõe a identificar o efeito de escala envolvido nas cargas de pressão medidas em vertedouros em degraus, através da comparação de três modelos físicos com diferentes escalas de redução.

4 Metodologia

4.1 Caracterização das Instalações Experimentais

Esta pesquisa utilizou na sua análise experimental três modelos reduzidos, com diferentes escalas, a fim de avaliar as características do escoamento por efeito da aeração natural.

Os modelos representam uma estrutura hipotética de um vertedouro escalonado, com altura de degraus de 0,9m, em escala de protótipo. Os três modelos possuem ogiva do tipo Creager e a mesma declividade de calha (1,00V:0,75H). A seguir, os dados com as principais características e dimensões de cada modelo são apresentados, de forma esquematizada, nas Figuras 7 e 8, enquanto que a tabela 3 os apresenta, de forma resumida, quantitativamente.

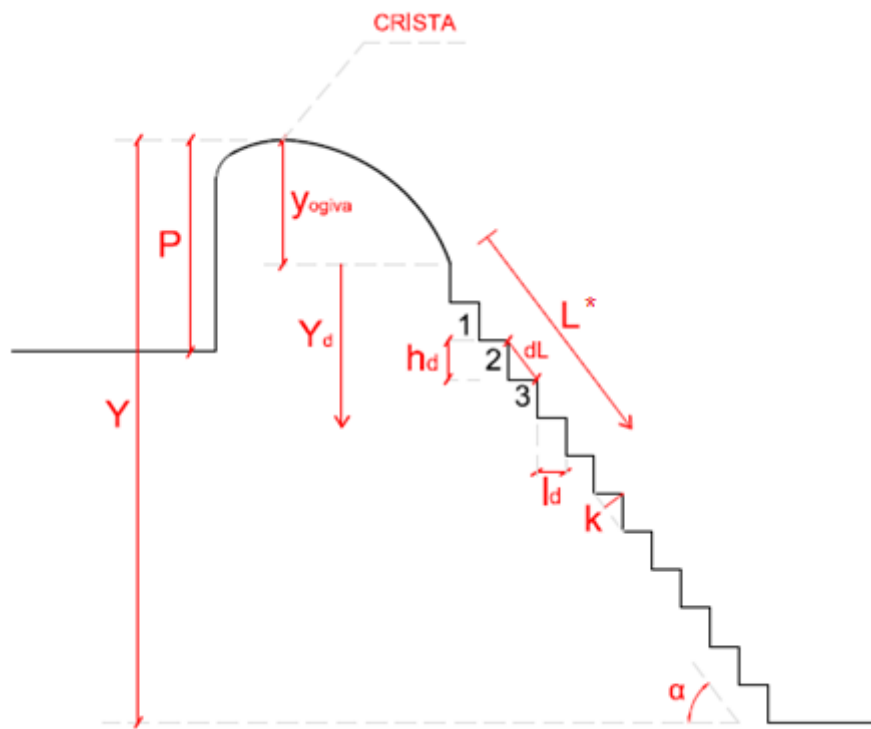


Figura 7 - Esquema vertedouro em degraus. Fonte: LOH

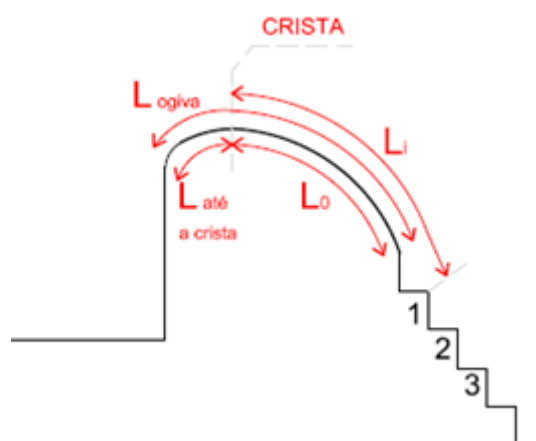


Figura 8 - Esquemática da ogiva. Fonte: LOH

Tabela 3 - Características gerais dos modelos reduzidos LAHE, LOH II e LAHE II.

Características	Símbolo	LAHE	LOH II	LAHE II	Unidade
Escala	-	1:10	1:15	1:30	-
Altura do vertedouro	Y	2,30	4,00	2,30	(m)
Altura do degrau	h_d	0,09	0,06	0,03	(m)
Patamar do degrau	l_d	0,0675	0,045	0,0225	(m)
Altura da ogiva	Y_{ogiva}	0,44	0,29	0,147	(m)
Rugosidade do degrau	k	0,054	0,036	0,018	(m)
Hipotenusa do degrau	dL	0,113	0,075	0,038	(m)
Comprimento da ogiva até a crista	$L_{at\acute{e} a crista}$	0,125	0,083	0,040	(m)
Comprimento da ogiva a partir da crista	L_0	0,780	0,52	0,26	(m)
Comprimento da ogiva	L_{ogiva}	0,905	0,603	0,300	(m)
Largura do vertedouro	B	1,15	0,50	1,15	(m)
Declividade da calha	α	53,13	53,13	53,13	(°)
Número de degraus	N_d	20	60	60	-
Faixa de vazões específicas ensaiadas	q_m	0,100 a 0,356	0,054 a 0,500	0,019 a 0,356	$m^3/s/m$

4.1.1 Modelo LAHE

O modelo LAHE, alocado no Laboratório de Hidráulica Experimental de FURNAS Centrais Elétricas possui escala de redução 1:10, em relação ao protótipo hipotético, com 20 degraus ao longo de sua calha, cada um com altura de espelho de 0,09m e com patamar de 0,0675m. A largura da calha do vertedouro (B) é de 1,15m e sua altura total é de 2,3m, dada pelo desnível entre a crista e o pé do vertedouro.

O modelo é abastecido por um circuito fechado, alimentado por 6 conjuntos moto-bombas, com 40 e 50 CV de potência. Compõe o sistema um reservatório subterrâneo; um reservatório superior (Figura 9), que recebe a água recalcada, mantido em nível constante; tanque de tranquilização; canal de montante; vertedouro em degraus e um canal de jusante que redireciona o escoamento até o reservatório inferior, fechando o ciclo.



Figura 9 - Vista do reservatório superior e da casa de bomba do modelo LAHE.

A condução do escoamento do reservatório superior até o tanque tranquilizante se dá por efeito da gravidade, por meio de um conjunto de tubulações de ferro fundido de 400mm de diâmetro (Figura 10). A estrutura do tanque tranquilizante é construída em concreto, com extensão aproximada de 40 metros, a passagem do fluido até o canal de montante é realizada por um muro de tijolos furados, conforme se observa nas Figuras 11 e 12.



Figura 10 - Sistema de condução de água do modelo LAHE.



Figura 11 - Tanque de tranquilização do modelo LAHE.



Figura 12 - Canal de montante do modelo LAHE

Na sequência, ao final do canal de montante que possui cerca de 10m de comprimento, foi instalada a ogiva, que possui geometria do tipo Creager e projetada em concreto, com altura (Y_{ogiva}) de 0,44m e comprimento (L_{ogiva}) de 0,905m.

A calha do vertedouro foi confeccionada em concreto, e instalada imediatamente ao final da ogiva, posicionada internamente no canal, junto a uma janela de vidro já existente, a fim de possibilitar a visualização do escoamento. A vazão máxima admitida no modelo é de cerca de $0,360\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. A Figura 13 apresenta a calha escalonada do modelo LAHE.

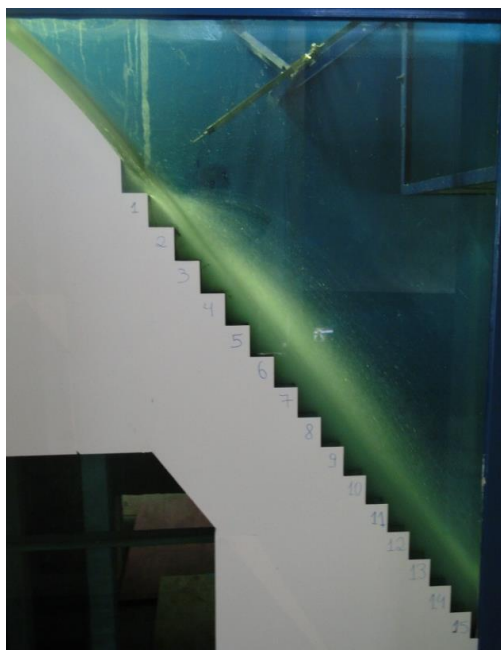


Figura 13 - Vista lateral do modelo LAHE.

4.1.2 Modelo LOH II

O modelo LOH II encontra-se instalado no Laboratório de Obras Hidráulicas, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). A escala de redução deste modelo é de 1:15, em relação ao protótipo hipotético, com degraus de 0,06m de altura de espelho e de 0,045m de patamar, contabilizando no total 60 degraus ao longo da calha.

Assim como o modelo LAHE, o sistema de alimentação do modelo LOH II é composto por um circuito fechado. Um reservatório inferior, com capacidade de armazenamento de 600m³ interliga-se, por meio de um sistema de bombeamento, ao reservatório de montante do modelo reduzido do vertedouro em degraus, que ao final de sua calha recolhe o fluido.

O sistema de recalque do LOH II compreende três bombas centrífugas, com 25, 50 e 75 CV de potência; tubulações de ferro fundido, com 300mm de diâmetro; além da inserção de peças especiais.



Figura 14 - Vista geral do modelo LOH II.

O modelo reduzido possui um tanque metálico de montante, projetado com chapas de 2mm de espessura, instalado a uma altura de 4,0m, com largura de 1,2m, profundidade variável de 1,0m a 1,5m e comprimento de 4,7m.

A ogiva do modelo LOH II, do tipo Creager, instalada no final do canal de aproximação, foi fabricada em acrílico transparente, com altura (Y_{ogiva}) de 0,29m e comprimento (L_{ogiva}) de 0,603m.



Figura 15 - Imagem aproximada da ogiva tipo Creager do modelo LOH II, construída em acrílico.

A calha escalonada, com degraus de altura de 0,06m, foi projetada em chapa de ferro galvanizada com largura de 0,5m e comprimento de 4,55m; e

suas paredes laterais fabricadas em módulos de acrílico, com 0,5m de altura, fixadas em perfis metálicos. A Figura 16 apresenta a vista lateral e frontal do modelo LOH II.



Figura 16 - Modelo LOH II: a) vista lateral e b) vista frontal do vertedouro em degraus.

4.1.3 Modelo LAHE II

O modelo LAHE II consiste em uma adaptação do modelo LAHE. Por esta razão, seu sistema de abastecimento, incluindo os reservatórios, poços e canais, bem como a largura da calha, são os mesmos. A modificação física restringiu-se exclusivamente a ogiva e a calha escalonada.

A alteração do fator de escala, de 1:30 em relação ao protótipo, resultou na redução da altura dos degraus para 0,03m nos espelhos e de 0,0225m nos patamares, totalizando assim 60 degraus ao longo da calha. O material utilizado na construção da calha permaneceu o mesmo do modelo antigo, em concreto. A Figura 17 apresenta a calha em degraus do modelo LAHE II.



Figura 17 - Vista lateral do modelo LAHE II.

A ogiva, mantida no formato Creager (Figura 18) e confeccionada em concreto, teve suas dimensões modificadas em função da escala adotada no novo modelo. Consequentemente, a altura da ogiva (Y_{ogiva}) foi de 0,147m e comprimento (L_{ogiva}) de 0,300m.

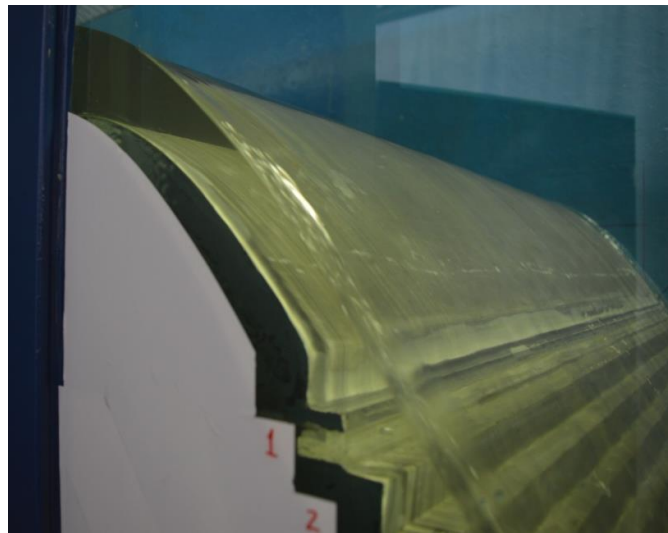


Figura 18 - Ogiva tipo Creager instalada no modelo LAHE II.

4.2 Condições de ensaio para cada modelo

No planejamento dos experimentos, quanto às vazões ensaiadas, buscou-se alcançar a maior discretização, variando as faixas dentro dos limites aplicáveis em cada estrutura, de forma a evitar o extravasamento do canal de montante dos vertedouros em degraus. A compatibilização dos testes, com vazões equivalentes, foi outro critério estabelecido.

Nos modelos LAHE e LAHE II, dado o fato de sua calha possuir maior largura, a gama de vazões ensaiadas teve uma faixa mais ampla, se comparada com aquelas realizadas no modelo LOH II.

Inversores de frequência foram empregados para controlar as vazões ensaiadas no modelo LOH II. Juntamente, medidores eletromagnéticos foram utilizados nos ensaios dos três experimentos, a fim de verificar a vazão testada nos modelos (Q_m). A obtenção da vazão volumétrica correspondente em protótipo (Q_p), em cada ensaio, se deu através do emprego da equação 25; enquanto que vazões específicas (q_m e q_p) foram obtidas pela relação apresentada na equação 26, seguindo o critério de semelhança de Froude.

$$\frac{Q_p}{Q_m} = \lambda^{\frac{5}{2}} \quad \text{Equação (25)}$$

$$\frac{q_p}{q_m} = \lambda^{\frac{3}{2}} \quad \text{Equação (26)}$$

Onde:

λ - relação entre comprimentos no protótipo e comprimentos no modelo.

As condições de ensaio executadas no modelo LAHE, LOH II e no LAHE II, são apresentadas respectivamente nas Tabelas 4, 5 e 6.

Tabela 4 - Condições de ensaio executadas no modelo LAHE

Q_m (L/s)	q_m (m³/s/m)	q_p (m³/s/m)	F^*
0,115	0,100	3,162	2,845
0,144	0,125	3,960	3,562
0,173	0,150	4,757	4,279
0,230	0,200	6,325	5,689
0,316	0,275	8,689	7,817
0,380	0,330	10,449	9,400
0,409	0,356	11,247	10,117

Tabela 5 - Condições de ensaio executadas no modelo LOH II
LOH II

Q_m (L/s)	q_m (m ³ /s/m)	q_p (m ³ /s/m)	F*
0,027	0,054	3,137	2,822
0,041	0,082	4,764	4,285
0,054	0,108	6,274	5,644
0,075	0,150	8,714	7,839
0,100	0,200	11,619	10,452
0,125	0,250	14,524	13,065
0,150	0,300	17,428	15,678
0,200	0,400	23,238	20,904
0,250	0,500	29,047	26,130

Tabela 6 - Condições de ensaio executadas no modelo LAHE II
LAHE II

Q_m (L/s)	q_m (m ³ /s/m)	q_p (m ³ /s/m)	F*
0,022	0,019	3,143	2,828
0,033	0,029	4,772	4,293
0,044	0,038	6,287	5,655
0,061	0,053	8,716	7,840
0,081	0,070	11,574	10,411
0,102	0,088	14,503	13,046
0,122	0,106	17,432	15,681
0,163	0,141	23,219	20,887
0,203	0,177	29,005	26,092
0,288	0,250	41,151	37,017
0,345	0,300	49,295	44,344
0,409	0,356	58,440	52,570

Dentre as vazões ensaiadas em cada modelo, analisando o número de Froude rugoso e a vazão específica em escala de protótipo e adotando diferenças de até 0,1m³/s/m, elencaram-se como condições de vazão equivalente aquelas apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Vazões Equivalentes entre os modelos LAHE, LOH II e LAHE II

q_p (m ³ /s/m)	F^*	LAHE	LOH II	LAHE II
3,1	2,8	X	X	X
4,8	4,3	X	X	X
6,3	5,7	X	X	X
8,7	7,8	X	X	X
11,6	10,4		X	X
14,5	13,0		X	X
17,4	15,7		X	X
23,2	20,9		X	X
29,0	26,1		X	X

4.3 Aquisição de dados

Durante as campanhas de ensaio realizadas nos modelos reduzidos analisaram-se os aspectos visuais do escoamento, além de coletar dados de grandezas físicas hidráulicas. Dentre as variáveis medidas está a posição de início de aeração, as cargas de pressão média e instantânea, e a profundidade do escoamento.

Complementarmente, instrumentos de imagem digitais foram utilizados em todas as configurações e experimentos, a fim de obter o registro visual característico, por meio de fotografias e vídeos.

A aquisição de informações das cargas de pressão foi feita por transdutores e por piezômetros, como mostra a Figura 19. Foram mensuradas as pressões médias, obtidas por piezômetros, e as pressões instantâneas por transdutores.

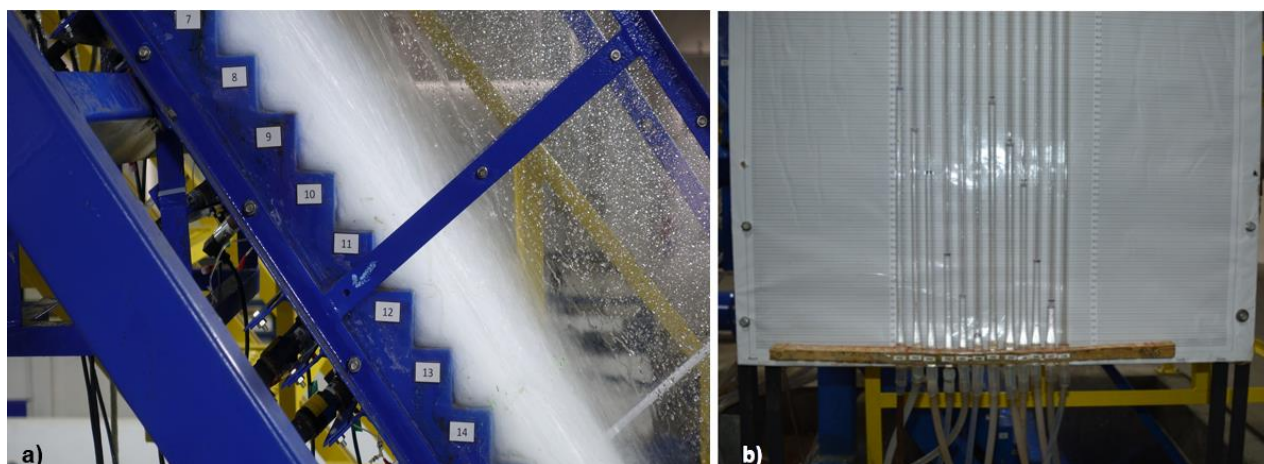


Figura 19 - a) Transdutores de pressão utilizados no modelo LOH II; b) Quadros piezométricos construídos no LOH II.

As tomadas de coleta das informações relativas às cargas de pressão foram realizadas na quina externa dos degraus, nos patamares e nos espelhos (Figura 20). O modelo LAHE possui uma relação entre a distância da quina até a tomada de pressão de $0,0833.l_d$ (m) para o patamar e $0,0833.h_d$ (m) para o espelho. Desta forma, no modelo LAHE a distância entre a quina externa do patamar e a tomada de pressão é de 5,6mm e no espelho é de 7,5mm; para o modelo do LOH II as tomadas estão a uma distância de 8,0mm em relação à quina externa; enquanto que, no modelo LAHE II a distância em relação às quinas do patamar e espelho são de 3,0mm.

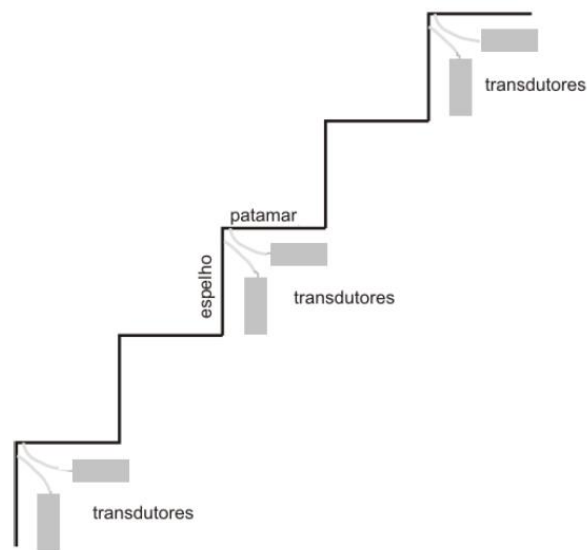


Figura 20 - Esquemática da disposição das tomadas de pressão nos degraus. Fonte: Conterato (2011).

O diâmetro do material utilizado na tomada de pressão instalada nos degraus dos modelos LAHE e LAHE II, tanto na porção do paramento vertical quanto no horizontal, é de 5,0mm e o diâmetro interno de 3,0mm. No modelo LOH II o diâmetro da tomada de pressão tem 3,2mm, ao passo que o diâmetro interno é de 1,7mm.

No processo de instalação dos equipamentos de medição de pressão houve o cuidado com especial atenção a evitar a presença de bolhas de ar nos tubos, bem como sobre as membranas dos transdutores. Reduzindo, desta maneira, os erros grosseiros envolvidos na medição das pressões médias e instantâneas.

A configuração da disposição dos instrumentos de coleta de pressão instalados ao longo da calha do modelo LAHE, no espelho e no patamar dos

degraus é apresentada nas Tabelas 8 e 9. Todos os equipamentos piezoresistivos utilizados neste modelo foram da marca ZURICH PSI.420 com precisão de 0,1% FE.

Tabela 8 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no espelho modelo LAHE

Espelho - LAHE				
Degrau	LI (m.c.a.)	LS (m.c.a.)	Exatidão	Erro (m.c.a.)
2	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
3	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
5	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
7	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
8	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
11	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
12	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
14	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
15	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003

FE = Fundo de Escala

Tabela 9 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no patamar modelo LAHE

Patamar - LAHE				
Degrau	LI (m.c.a.)	LS (m.c.a.)	Exatidão	Erro (m.c.a.)
2	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
4	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
5	-1,000	2,000	0,1% FE	0,003
8	-1,000	3,000	0,1% FE	0,004
9	-1,000	3,000	0,1% FE	0,004
11	-1,000	3,000	0,1% FE	0,004
12	-1,000	3,000	0,1% FE	0,004
15	-1,000	3,000	0,1% FE	0,004
16	-1,000	3,000	0,1% FE	0,004

No modelo LOH II a instrumentação da calha se deu por transdutores de diferentes modelos/séries, como mostram as Tabelas 10 e 11. São apresentados, para cada degrau instrumentado, o modelo e série dos equipamentos utilizados, assim como características técnicas quanto o limite de aplicação recomendado e exatidão.

Tabela 10 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no espelho modelo LOH II

Espelho - LOH II					
Degrau	LI (m.c.a.)	LS (m.c.a.)	Exatidão	Modelo/Série	Erro (m.c.a.)
2	-0,703	0,703	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,001
3	-0,703	0,703	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,001
5	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
6	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
7	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
8	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
9	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,023
11	-0,703	0,703	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,001
12	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
13	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
14	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
15	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
16	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
18	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
19	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
20	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
22	-1,758	1,758	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,003
23	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
26	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
29	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
32	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
35	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
40	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
42	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
46	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015
51	-1,530	1,530	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0,015

Tabela 11 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no patamar modelo LOH II

Patamar - LOH II					
Degrau	LI (m.c.a.)	LS (m.c.a.)	Exatidão	Modelo/Série	Erro (m.c.a.)
2	-0,703	0,703	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,001
4	-0,703	0,703	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,001
5	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
6	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
7	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
8	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
9	-3,515	3,515	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,006
10	-3,515	3,515	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,006
11	-0,703	0,703	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,001
12	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
13	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
14	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
15	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
16	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
18	-3,515	3,515	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,006
19	-3,515	3,515	0,08% FE	ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0,006
20	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
22	-0,714	2,753	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0,017
23	-0,500	1,500	0,25% FE	HYTRONIC - TM25/250M/R/44/D/2B (SÉRIE: HO)	0,005
25	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
26	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
29	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
32	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
35	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
40	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
42	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
46	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023
51	-1,530	3,059	0,5% FE	SITRON - SP96 (SÉRIE: SNO)	0,023

As Tabelas 12 e 13 expõem a configuração da distribuição dos equipamentos de medição de pressão ao longo da calha do modelo LAHE II. Neste experimento os transdutores da marca Zurich PSI 420 e Hytronic TM01 foram utilizados, ambos com exatidão de 0,1%. O arranjo das posições atentou-se as faixas de operação de cada dispositivo.

Nos anexos é possível encontrar maiores detalhes sobre os transdutores utilizados em cada modelo.

Tabela 12 - Configuração da instalação de transdutores de pressão no espelho modelo LAHE II

Espelho - LAHE II					
Degrau	LI (m.c.a.)	LS (m.c.a.)	Exatidão	Modelo/Série	Erro (m.c.a.)
2	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
3	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
5	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
7	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
8	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
11	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
12	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
14	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
15	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
20	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
24	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
26	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
28	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
31	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
35	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
39	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
41	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
45	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
51	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025

Tabela 13- Configuração da instalação de transdutores de pressão no patamar modelo LAHE II

Patamar - LAHE II					
Degrau	LI (m.c.a.)	LS (m.c.a.)	EXATIDÃO	Modelo/Série	ERRO (m.c.a.)
2	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
4	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
5	-1	2	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,003
8	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
9	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
11	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
12	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
15	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
16	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
20	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
25	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
29	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
32	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
35	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
40	-1	3	0,1% FE	Zurich PSI 420	0,004
42	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
46	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025
51	-1	1.5	0,1% FE	Hytronic TM01	0,0025

O processo de aferição dos transdutores antecedeu a coleta das informações. Nesta etapa valores de tensão e/ou corrente, obtidos por um conversor analógico digital, foram relacionados a diferentes níveis de água, de modo a obter a curva de aferição de cada um dos sensores. Este processo foi elaborado no ambiente dos softwares LabView e AQDADOS.

Os ensaios foram realizados durante um período de 10 minutos, com frequência de aquisição de 100 Hz de forma simultânea, em todos os degraus instrumentados em cada modelo, para as vazões testadas. Obtiveram-se assim 60.000 dados em cada tomada de pressão, constituindo, desta maneira, uma amostra expressiva.

Os quadros piezométricos confeccionados nos próprios laboratórios foram graduados em escala milimétrica. A pressão zero, obtida na condição em que não há escoamento sobre a calha vertente, foi referenciada altimetricamente, para, posteriormente, ser descontada das leituras realizadas durante a campanha de ensaios e assim resultar no valor das pressões atuantes.

Os dados de pressão média obtidos pelos quadros piezométricos foram comparados com aqueles estimados pela média dos valores medidos pelos transdutores de pressão; indicando assim, a necessidade ou não de se repetir os ensaios.

Além da estimativa das cargas de pressão média, através da extração da média aritmética com base nos dados das pressões instantâneas medidas pelos transdutores, obtiveram-se as flutuações de pressão, por meio da estimativa do desvio padrão em relação à média, e os percentis de 0,1% e 99,9%.

O nível d'água foi medido com o uso de uma ponta linimétrica, situada no centro da largura da calha dos modelos, de forma perpendicular ao pseudofundo (Figura 21). Contudo, existe uma grande variação no nível d'água, dada a característica turbulenta do escoamento, fato que dificulta sua determinação. Por esta razão, na presente pesquisa a altura perpendicular ao pseudofundo (h_o) foi obtida de modo teórico, empregando a equação 27:

$$h_o = h \cdot \cos \alpha \quad \text{Equação (27)}$$

Onde:

h_o – altura perpendicular ao pseudofundo (m);

h - altura perpendicular ao plano horizontal (m);

α – ângulo de inclinação da calha ($^\circ$).

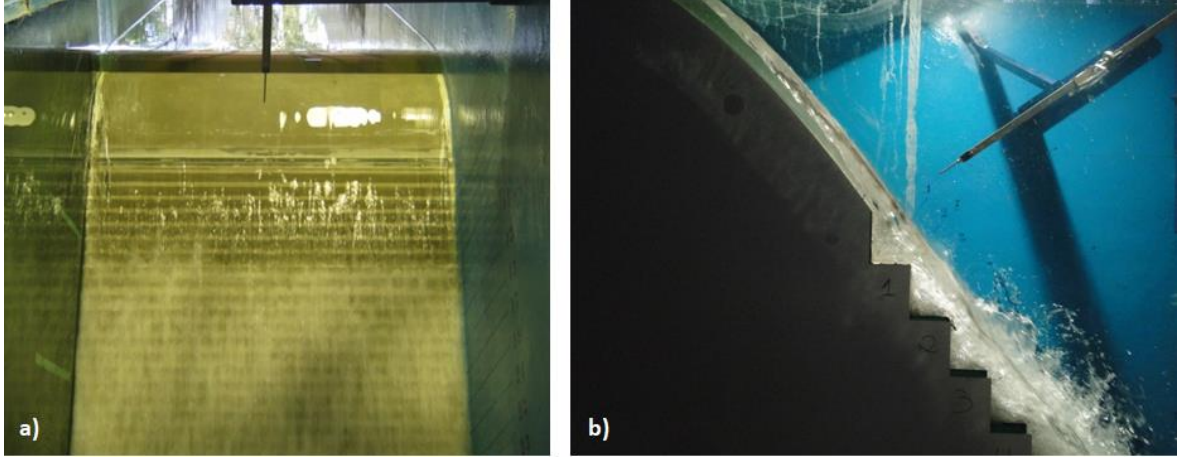


Figura 21 - Ponta Linimétrica instalada no centro da calha em degraus do modelo LAHE II:
a) vista frontal; e b) vista lateral.

A determinação da altura perpendicular ao plano horizontal (h) se deu por um processo iterativo, relacionando-o com a altura crítica (h_c), conforme equações 28 a 31, cujas grandezas estão ilustradas na Figura 22.

$$\frac{E_c}{E} = 1 \quad \text{Equação (28)}$$

$$E_c = h_c + \frac{v_c^2}{2 \cdot g} + z_c \quad \text{Equação (29)}$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q_m^2}{g}} \quad \text{Equação (30)}$$

$$v_c = \frac{Q_m}{B \cdot h_c} \quad \text{Equação (31)}$$

Onde:

E - energia específica (m);

E_c - energia crítica (m);

h_c - altura crítica (m);

q_m - vazão específica em escala de modelo ($m^3/s/m$);

v_c - velocidade crítica (m/s);

Q_m - vazão volumétrica em escala de modelo (m^3/s);

B - largura da calha, em escala de modelo (m).

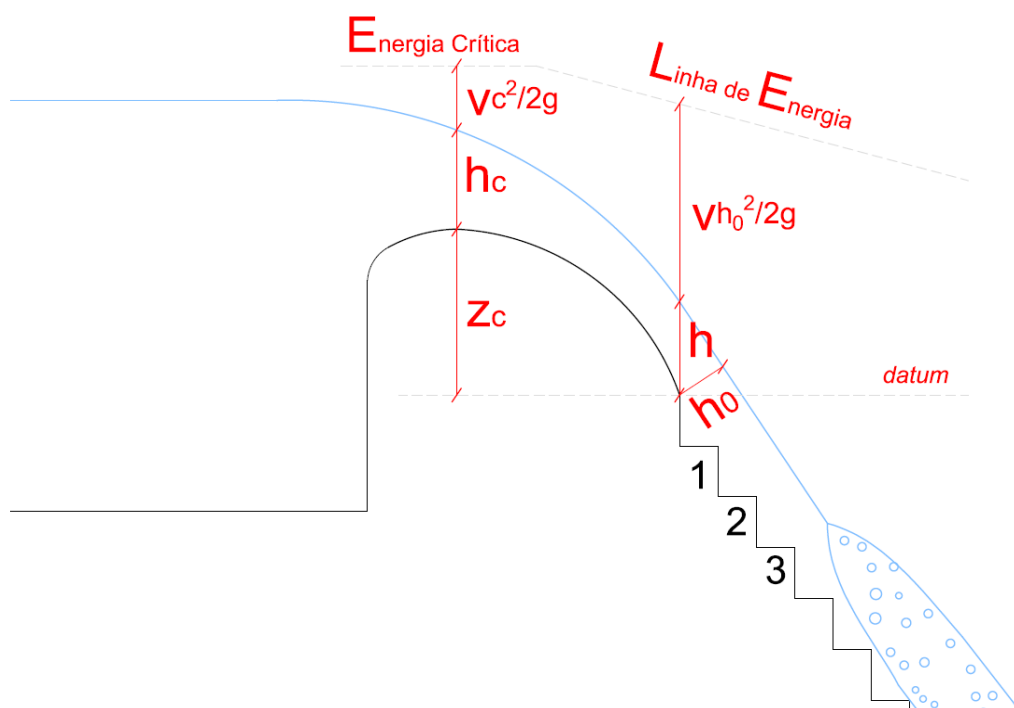


Figura 22 - Esquemática das variáveis envolvidas no processo de estimativa da altura perpendicular ao pseudofundo (h_0). Fonte: LOH

A posição de início de aeração incipiente e total, para cada vazão ensaiada, foi realizada de forma visual, através da identificação do número do degrau e, conseqüentemente, atrelada a distância em relação à ogiva. A Figura 23 elucida a identificação da posição de início de aeração no modelo LAHE II, a título de exemplo.

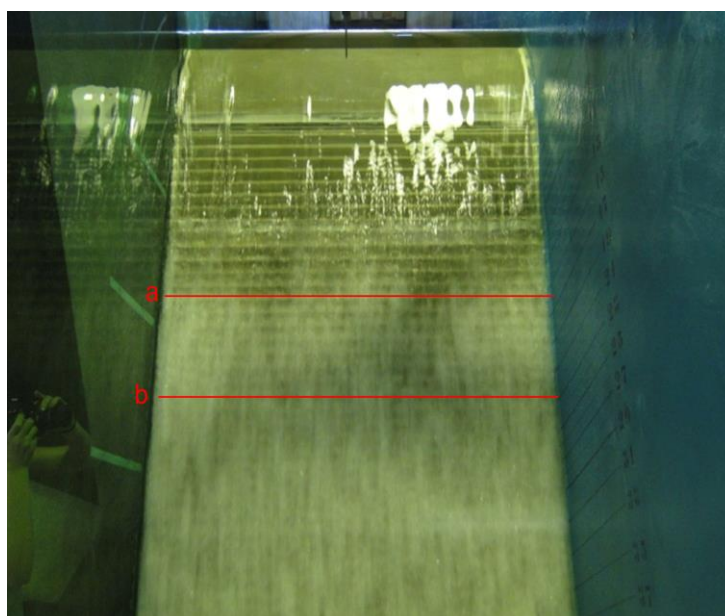


Figura 23 - Exemplificação da determinação da posição de início de aeração (a) incipiente (b) total no modelo LAHE II

4.4 Metodologia Analítica

A análise e a interpretação dos dados coletados nos diferentes modelos físicos de escala reduzida visou avaliar os efeitos de escala envolvidos. Por esta razão, o modo adotado para confrontar as informações foi convertê-las para a escala de protótipo, pois, como já apresentado anteriormente, os modelos LAHE, LOH II e LAHE II representam o mesmo protótipo hipotético, apenas com escalas de redução diferentes.

A conversão dos dados coletados foi realizada seguindo a Lei de Semelhança de Froude, multiplicando cada variável linear a seu fator de escala no modelo e as vazões como mencionado no item 4.2 seguiu o emprego das equações 25 e 26.

Reunindo as informações, em escala de protótipo, realizaram-se as seguintes análises apresentadas nos itens 4.4.1 a 4.4.4.

4.4.1 Comportamento das cargas de pressão nos patamares e espelhos

Inicialmente, a fim de compreender o comportamento das cargas de pressão ao longo da calha em degraus, traçaram-se modelos gráficos para patamar e espelho de cada modelo, individualmente.

Foram gerados gráficos com conteúdos distintos do acervo de dados de pressão (composto por carga de pressão média, flutuação de pressão, e pressões extremas - com percentis de 0,1% e 99,9%), reunindo em cada gráfico a mesma variável em análise, para as diferentes vazões ensaiadas, de forma discretizada. Nesta ocasião, o traçado confrontou os dados de carga pressão (eixo das ordenadas) com o número do degrau ao longo da calha (eixo das abscissas).

Posteriormente, após identificar individualmente a evolução das características referentes às cargas de pressão em cada modelo, os dados dos três modelos foram agrupados.

O método gráfico visual foi empregado com o intuito de verificar as diferenças existentes, devido a efeitos de escala, no comportamento das pressões atuantes nos patamares e nos espelhos dos degraus entre os modelos utilizados neste estudo. Foram plotados gráficos com os diferentes dados de carga de pressão ao longo da calha, medidos e estimados, nos

modelos LAHE, LOH II e LAHE II, de modo simultâneo, correspondentes às vazões equivalentes, e associando-as ao número do degrau ao longo da calha.

4.4.2 Análise adimensional

O processo de adimensionalização foi adotado na interpretação dos dados coletados, com a intenção de ampliar a discussão e generalizar a comparação. Foram testados distintos conjuntos adimensionais, de acordo com aqueles encontrados e consolidados pela literatura.

O eixo das ordenadas foi adimensionalizado por meio do emprego do coeficiente de pressão (CP); do adimensional de pressão ζ_{p_x} ; pela razão da extensão da calha escalonada, desconsiderando a ogiva, e a rugosidade do degrau (L^*/k); assim como pela razão da posição do início de aeração e a rugosidade do degrau (L_a/k).

O coeficiente de pressão (CP) foi obtido pela equação 15, de Amador (2005). Para a determinação de CP, foram adimensionalizadas as pressões médias, as flutuações de pressão e os percentis das amostras de pressão de 0,1% e 99,9%. Cabe salientar que, o termo velocidade média do escoamento (v) utilizado nas adimensionalizações foi estimado pela relação entre a vazão específica em escala de protótipo (q_p) e a altura perpendicular ao pseudofundo do escoamento no início da calha (h_o).

O adimensional de pressão ζ_{p_x} empregado relacionou as variações de pressão com a altura crítica do escoamento, conforme equação 32.

$$\zeta_{p_x} = \frac{\frac{P_x}{\gamma}}{h_c} \quad \text{Equação (32)}$$

Onde:

ζ_{p_x} – adimensional de pressão x;

x – índice de pressão adotado, podendo assumir valores variando de 0,1% à 99,9%;

h_c - altura crítica (m) – equação 33;

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q_p^2}{g}} \quad \text{Equação (33)}$$

Onde:

h_c - altura crítica (m);

q_p - vazão específica em escala de protótipo ($m^3/s/m$);

g – aceleração da gravidade (m/s^2).

A determinação dos termos L^* e L_a se deram através da análise visual do degrau de início de aeração, para cada vazão ensaiada, em cada modelo. Sendo que L^* distingue-se de L_a por desconsiderar o comprimento da ogiva. A rugosidade do degrau (k) foi obtida pela equação 12.

No eixo das abscissas empregaram-se: o adimensional número de Froude rugoso (F^*) – equação 13; o adimensional de posição longitudinal (S'); e a relação entre a razão da extensão da calha escalonada, considerando a ogiva, com a extensão do ponto de início de aeração (L/L_a).

A adimensionalização da posição longitudinal ao longo da calha escalonada (S') se deu pela adoção da equação 16, de Mattos (1999). Sendo que a determinação do parâmetro de profundidade equivalente de água na seção de afloramento da camada limite (h_a) foi obtida pela equação 8, de Sanagiotto (2003).

4.4.3 Análise dos Erros

Os instrumentos usados para medir as pressões ao longo da calha escalonada dos vertedouros possuem faixas de aplicação recomendável, exatidão e por consequência, erros atrelados as informações que reproduzem (verificar Tabelas 8 a 13). Os dados coletados pelos transdutores de pressão foram comparados com as variações dos possíveis valores que os erros inerentes aos equipamentos podem apresentar, para mais ou para menos. Cabe salientar que, assim como já mencionado, tal verificação será elaborada com os valores em escala de protótipo.

A análise dos erros dos equipamentos consistirá em avaliar adimensionalmente as pressões, por meio do adimensional CP (eixo Y), contra o adimensional L/L_a (eixo X). As pressões medidas serão descontadas do erro

dos instrumentos, como também acrescidas dos mesmos; seguindo a formulação apresentada na equação 34:

$$CP = \frac{\frac{P}{\gamma} \pm \text{Erro}_{\text{protótipo}}}{\frac{v^2}{2g}} \quad \text{Equação (34)}$$

Onde:

$\frac{P}{\gamma}$ – carga de pressão que se deseja adimensionalizar (m.c.a.);

$\text{Erro}_{\text{protótipo}}$ - erro do transdutor, em escala de protótipo (m.c.a.);

v - velocidade média do escoamento (m/s);

g - aceleração da gravidade (m/s²).

A avaliação será replicada para todas as vazões ensaiadas, com os diferentes dados de cargas de pressão, de cada um dos três modelos. Para verificar a interferência dos erros dos transdutores no efeito de escala foi elaborada a comparação entre as vazões equivalentes.

4.4.4 Curva de Probabilidade de Não-excedência de Pressões

A curva de probabilidade de não-excedência de pressão expressa a distribuição das cargas de pressões extremas (percentis) pelo seu percentual. Através desta curva é possível identificar de modo direto o percentual do conjunto dos dados em que os valores de carga de pressão, para um determinado degrau, são menores ou iguais.

A seleção dos degraus avaliados restringiu-se àqueles instrumentados no modelo LAHE, visto que neste modelo, dado o menor fator de escala e maior altura dos degraus, o número de degraus ao longo da calha é menor.

Para cada vazão, identificou-se o ponto de início de aeração, no modelo LAHE. Os seguintes critérios foram adotados na seleção dos degraus:

- Degrau mais próximo da ogiva;
- Degrau posicionado imediatamente a montante do ponto de início de aeração;
- Degrau posicionado imediatamente a jusante do ponto de início de aeração;
- Último degrau instrumentado na calha.

A escolha dos referidos degraus visou compreender a porção não aerada do escoamento, bem como aquela totalmente aerada, com escoamento quase uniforme.

A construção da curva reuniu os dados dos três modelos, para o mesmo degrau, com vazões equivalentes.

5 Resultados e Discussão

5.1 Comportamento longitudinal das cargas de pressão

O comportamento das cargas de pressão média, flutuantes e extremas com probabilidade de não-excedência de 0,1%, e 99,9% ao longo da calha escalonada foi avaliado individualmente, para cada modelo físico. Os valores de carga de pressão registrados em cada vazão ensaiada, nos diferentes modelos, foram convertidos para a escala de protótipo, como já mencionado anteriormente.

O desenvolvimento das cargas de pressão registradas no patamar e no espelho do modelo LAHE, com escala 1:10, pode ser consultado no Apêndice A. No Apêndice B é apresentado o comportamento das cargas de pressão registradas no patamar e espelho do modelo LOH II, com escala 1:15, enquanto que, no Apêndice C, são observadas as cargas de pressão ao longo da calha do modelo LAHE II, com escala de 1:30.

5.1.1 Comportamento longitudinal das cargas de pressão, entre vazões equivalentes

De modo a confrontar o comportamento longitudinal do desenvolvimento das cargas de pressão entre os três modelos utilizados neste estudo, com escalas de 1:10 (modelo LAHE), 1:15 (modelo LOH II) e escala de 1:30 (modelo LAHE II), optou-se por realizar a comparação em condições que apresentem, quando convertida para escala de protótipo, a mesma vazão.

Entre os três modelos reduzidos empregados nesta pesquisa, como mostra a tabela 7, atingiu-se 4 condições de ensaio com vazões equivalentes entre todos os modelos e de mais 5 vazões correspondentes entre os modelos LOH II e LAHE II.

Este tópico apresenta a comparação no desenvolvimento das cargas de pressão entre os modelos estudados, em função das vazões equivalentes às vazões específicas em escala de protótipo de $3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e de $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

A escolha destas vazões, em relação as demais testadas, se deu pelo fato de assim ser possível a comparação entre a mínima vazão equivalente

entre os três modelos ($q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$). Nesta condição de ensaio, por se tratar de uma vazão com magnitude inferior as demais, o ponto de início de aeração ocorre na porção mais próxima à crista; fato que apresenta a melhor condição para o emprego da técnica dos vertedouros em degraus, pois praticamente em toda a calha o escoamento apresenta aeração natural devido ao efeito da macrorrugosidade dos degraus.

Optou-se também por confrontar o comportamento das cargas de pressão para a vazão máxima equivalente ensaiada nos três modelos ($q_p=8,7\text{m}^2/\text{s}/\text{m}$). E ainda, de modo a identificar a influência da vazão nas cargas de pressão, se analisou a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, sendo esta ensaiada apenas nos modelos LOH II e LAHE II.

5.1.1.1 Vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

A menor vazão equivalente ensaiada nos três modelos, com vazão específica em escala de protótipo de $3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, corresponde a vazão ensaiada no modelo LAHE de 115L/s, no modelo LOH II a 27 L/s e no modelo LAHE II a 22L/s.

A partir da Figura 24 (a) observa-se que, de modo geral, o modelo LAHE II tem a propensão a superestimar os valores de carga de pressão média em relação aos demais modelos. Ainda é possível inferir que, de modo oposto, o modelo LOH II tende a apresentar valores de carga de pressão média inferiores aqueles apresentados nos demais modelos.

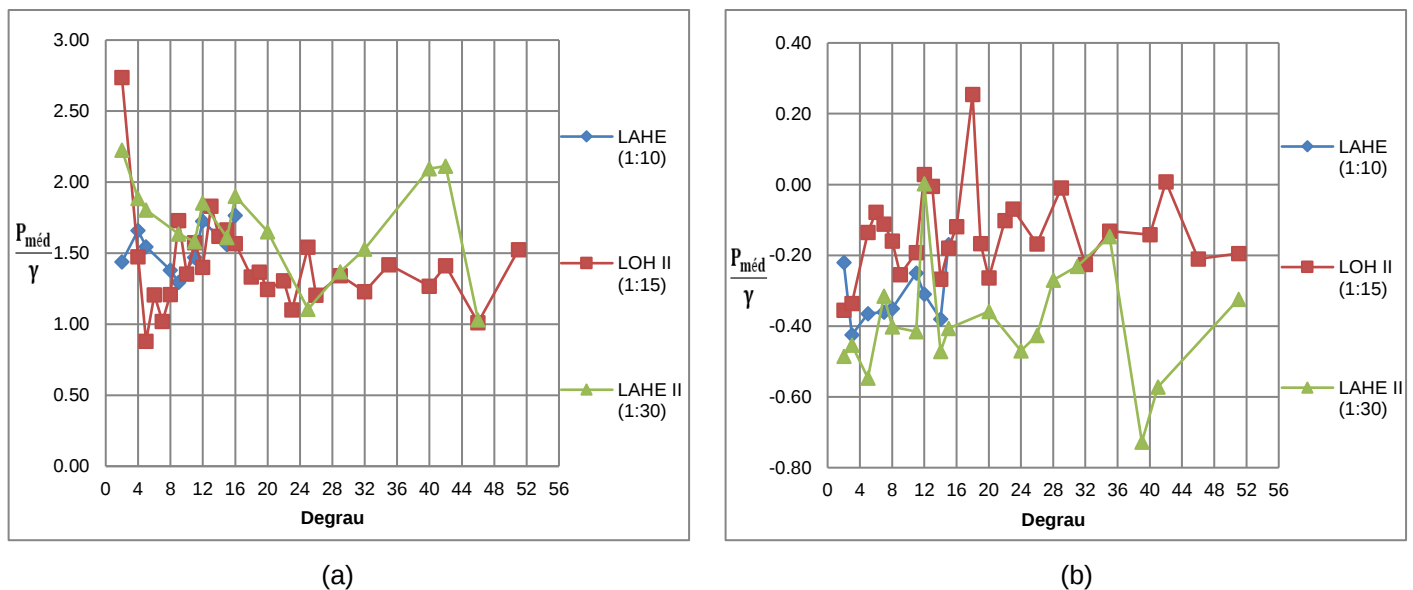


Figura 24 – Comparação do comportamento das cargas de pressão média, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Esta análise, contudo, não se aplica aos degraus de número 2, 9 e 11 onde o valor mínimo registrado foi verificado no modelo LAHE. Cabe destacar que no degrau de número 2 existe uma grande divergência entre os dados coletados no patamar dos três modelos.

Após o degrau de número 16, região que não apresenta mais os dados coletados no modelo LAHE, pode-se assumir que o comportamento permanece constante, com o modelo LAHE II superestimando os valores de carga de pressão média e o modelo LOH II os subestimando, com a exclusão do degrau 25.

No espelho ocorre o inverso, como mostra a Figura 24 (b). O modelo LOH II apresenta valores de carga de pressão média maiores do que os demais modelos, enquanto o modelo LAHE II apresenta valores menores. O modelo LAHE apresenta valores medianos entre os modelos LOH II e LAHE II, com exceção dos degraus de número 7 e 12, que apresentam valores ainda menores aos registrados pelo LAHE II, assim como para o degrau 2, que registra um valor de carga de pressão média maior que o modelo LOH II.

A figura 25 traz a comparação das flutuações de pressão entre os modelos LAHE, LOH II e LAHE II.

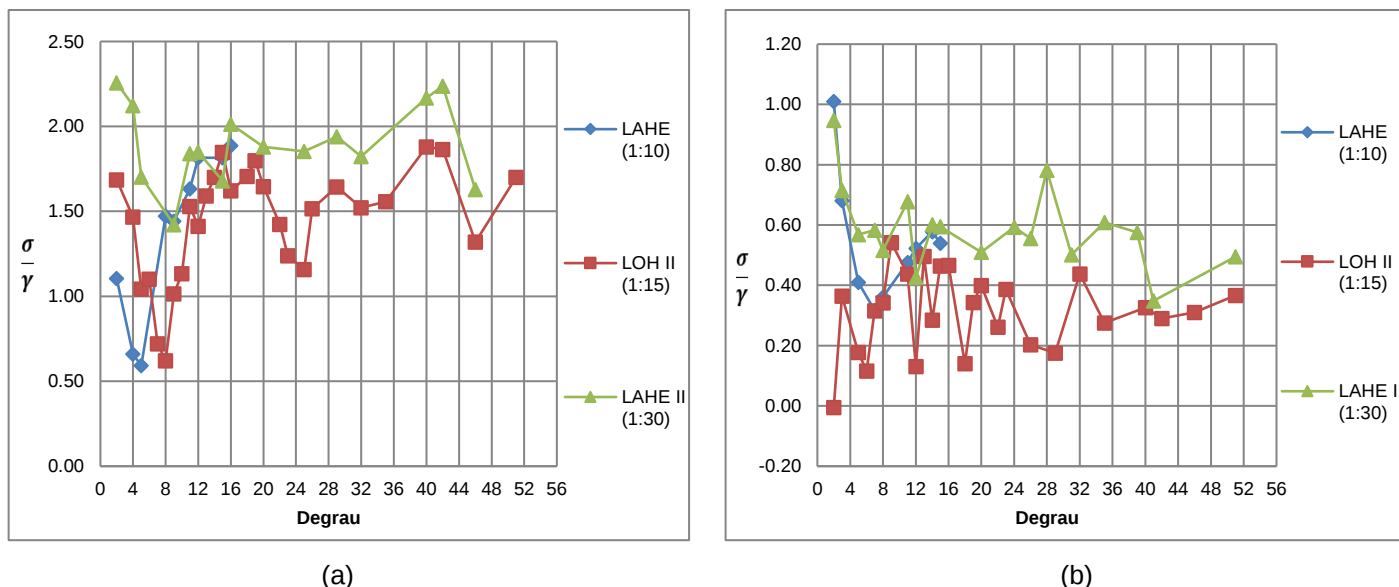


Figura 25 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

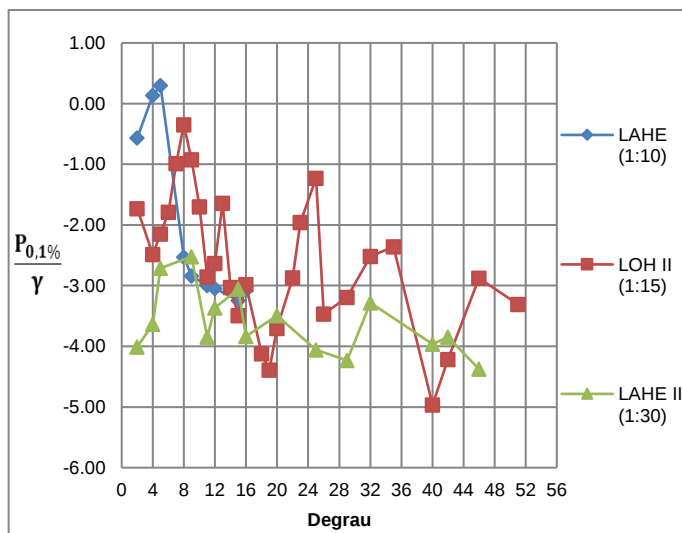
Para o patamar, até o degrau de número 5, o modelo LAHE apresentou valores de flutuação de carga de pressão inferiores àqueles observados nos demais modelos. Nestes degraus iniciais, o modelo LAHE II apresentou valores de flutuação de carga de pressão mais elevados.

A diferença entre os valores nos degraus mais próximos a ogiva, entre os três modelos, atingiu a marca de 1,5m.c.a. no degrau de número 4.

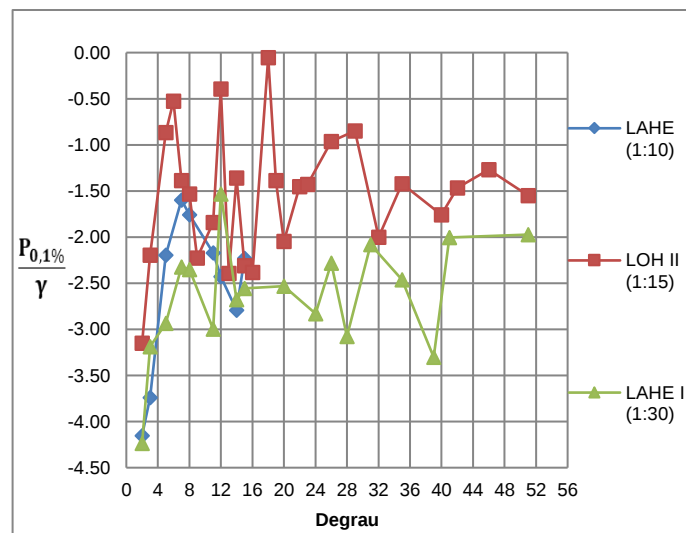
A partir do degrau de número 8, observa-se que o modelo LAHE II, predominantemente, expressa valores de flutuação de carga de pressão superiores aqueles verificados nos demais modelos. De modo inverso, o modelo LOH II apresenta valores inferiores. Ao longo do comprimento da calha a maior diferença entre as flutuações de pressão, desconsiderada aquela já verificada no degrau 4, é observada no degrau de número 25 com 0,7m.c.a.

No espelho, o modelo LOH II apresenta valores de flutuação de pressão menores que os demais modelos, para todos os degraus. Em contrapartida, o modelo LAHE II apresenta os maiores valores. A diferença entre as flutuações atinge 1,0m.c.a para os degraus mais próximos da crista, e de até aproximadamente 0,6m.c.a. ao longo do comprimento da calha.

A Figura 26 apresenta a comparação entre as cargas de pressão extrema mínima observadas nos três modelos, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, para a vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



(a)



(b)

Figura 26 - Comportamento longitudinal das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 0,1%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s/m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

No patamar, a grande maioria dos valores de carga de pressão extrema apresenta valores negativos, exceto para o modelo LAHE, onde alguns pontos positivos podem ser identificados. Os valores máximos registrados encontram-se na porção mais a montante da calha e são evidenciados no modelo LAHE, atingindo a marca de até 0,3m.c.a. no degrau 5.

A diferença entre os modelos para os valores de carga de pressão extrema, com probabilidade de não-excedência de 0,1% atinge valores de 3,4m.c.a., em módulo, no degrau de número 2.

A partir do degrau de número 8 o modelo LAHE tende a apresentar valores intermediários aos demais modelos, aproximando-se daqueles verificados pelo modelo LAHE II.

O comportamento das cargas de pressões extremas mínimas para o patamar do modelo LOH II é mais atenuado que o observado no modelo LAHE II. Os degraus 20, 40 e 42 fogem deste padrão e apresentam valores ainda menores que os do LAHE II.

Para o espelho, como mostra a Figura 26 (b), todos os valores de carga de pressão extrema mínima são negativos. Entre os três modelos observa-se que o modelo LAHE II indica valores extremos mínimos menores que aqueles observados pelos obtidos no modelo LOH II.

No entanto, para os degraus de número 2 e 3 os valores extremos mínimos de -4,1m.c.a. e de -3,7m.c.a. são verificados no modelo LAHE. A diferença entre as cargas de pressão extrema chega, ao longo da calha em degraus, a valores de cerca de 2,5m.c.a entre os modelos.

Na Figura 27 é apresentada a comparação entre as cargas de pressão extrema máxima, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, entre os modelos físicos de escala reduzida.

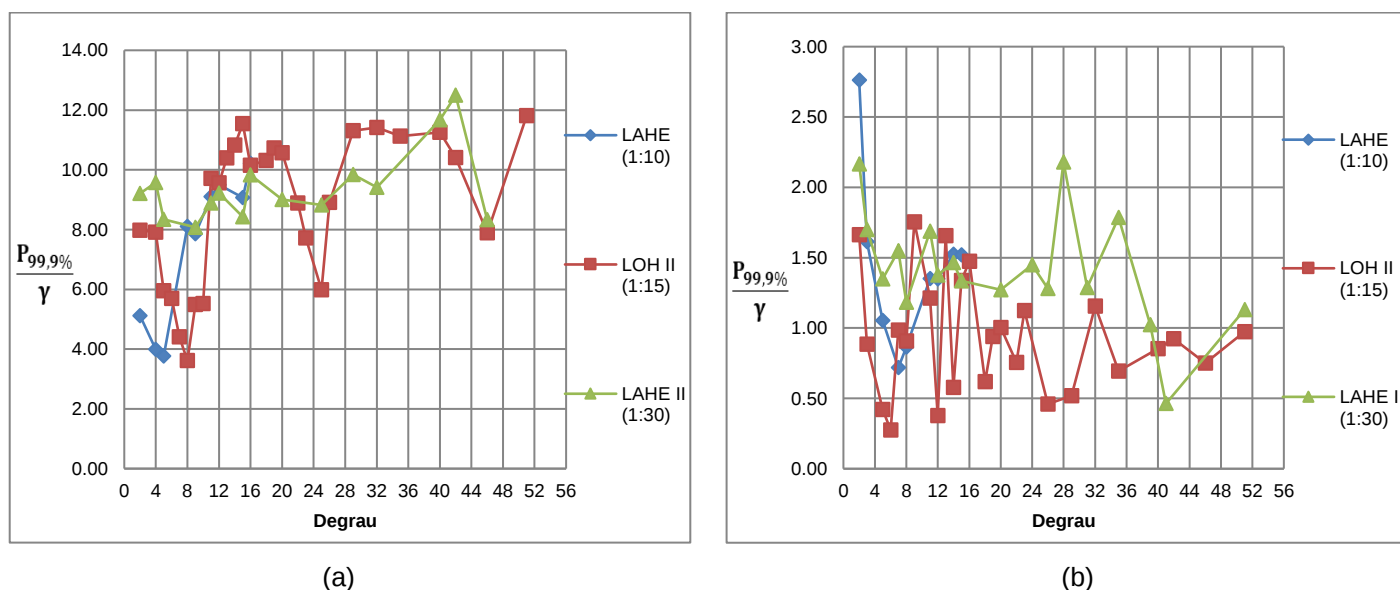


Figura 27 - Comportamento longitudinal das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 99,9%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Observa-se que no patamar, na maioria dos casos, o modelo LOH II apresentar valores superiores aos demais modelos. De modo oposto, o modelo LAHE II apresenta, a partir do degrau 11, valores de carga de pressão extrema máxima predominantemente inferiores aos demais modelos.

O modelo LAHE, nos degraus iniciais, apresenta valores inferiores aos outros modelos, até o ponto em que a partir do degrau de número 8 passa a apresentar valores intermediários.

Para as cargas de pressão extremas observadas no patamar, com probabilidade de não-excedência de 99,9% a maior diferença entre os modelos é verificada nos degraus iniciais da calha, na ordem de 5,6m.c.a. Ao longo da calha escalonada esta diferença cai para aproximadamente 2,8m.c.a.

No espelho, o modelo LOH II apresenta valores de carga de pressão extremo máximas menores que os observados nos outros modelos. Já o

modelo LAHE II tende a apresentar valores maiores que os observados nos modelos LAHE e LOH II.

Para o espelho, a maior diferença entre as cargas de pressão extrema é de 1,7m.c.a. entre os modelos, observado na metade da extensão da calha, próximo aos degraus 28 e 29.

5.1.1.2 Vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

A maior vazão equivalente ensaiada entre os três modelos, igual a vazão específica em escala de protótipo de $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, representa a vazão ensaiada no modelo LAHE de 316L/s (escala 1:10), no modelo LOH II a 75 L/s (escala 1:15) e no modelo LAHE II de 61L/s (escala 1:30).

A figura 28 traz a comparação entre os valores de carga de pressão média, para as vazões equivalentes a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, entre os modelos LAHE, LOH II e LAHE II.

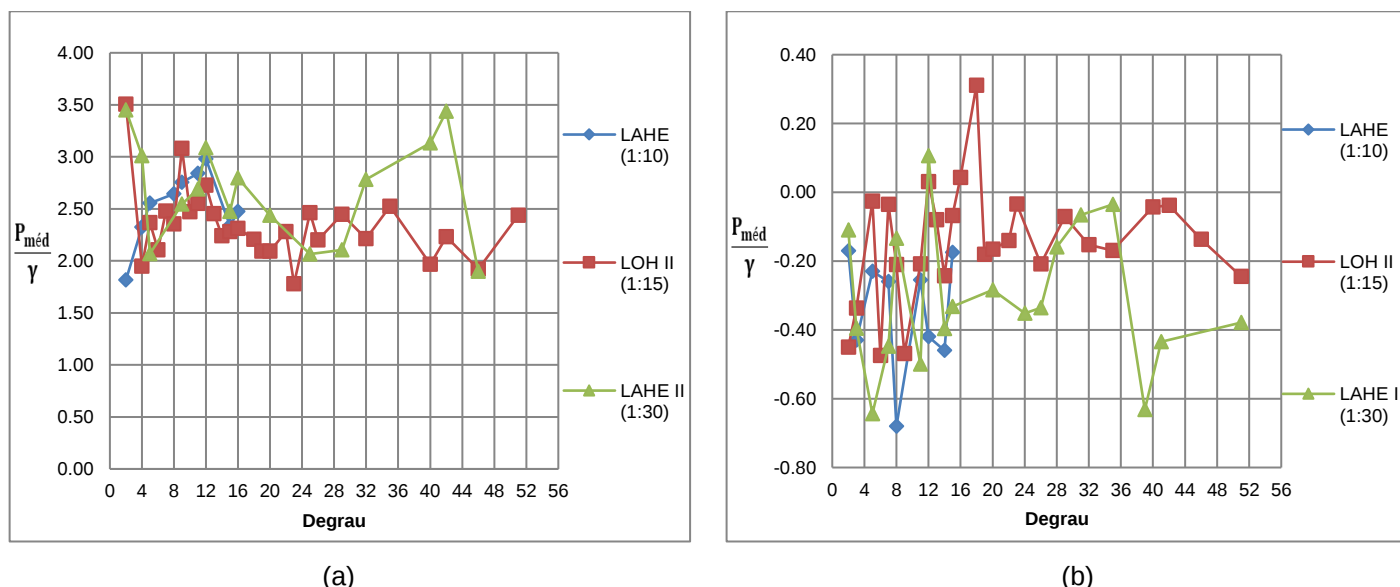


Figura 28 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

No patamar, todos os valores de carga de pressão média apresentam valores positivos. De modo geral, o modelo LAHE II indica valores maiores do que os observados nos demais modelos. Ao passo em que o modelo LOH II registrou, quase que na totalidade da calha em degraus, valores de carga de pressão menores que o observado nos demais modelos.

No início da calha, os valores computados nos patamares dos três modelos físicos diferiram em até 1,7m.c.a. No final da calha a diferença máxima entre os valores registrados nos modelos é inferior a 1,2m.c.a.

Os dados de carga de pressão média dos espelhos dos degraus apresentaram valores maiores para o modelo LOH II na vazão equivalente analisada entre os modelos. Até o ponto em que há registro de carga de pressão no modelo LAHE, não é possível indicar que o mesmo possua similaridade com as distribuições observadas nos demais modelos. A partir do degrau 20, nota-se que o modelo LAHE II passa a registrar valores menores que aqueles verificados no modelo LOH II. A maior diferença entre as cargas de pressão média observadas no espelho é de 0,6m.c.a.

A figura 29 apresenta o comportamento longitudinal das cargas de pressão flutuantes com vazão equivalente a $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II.

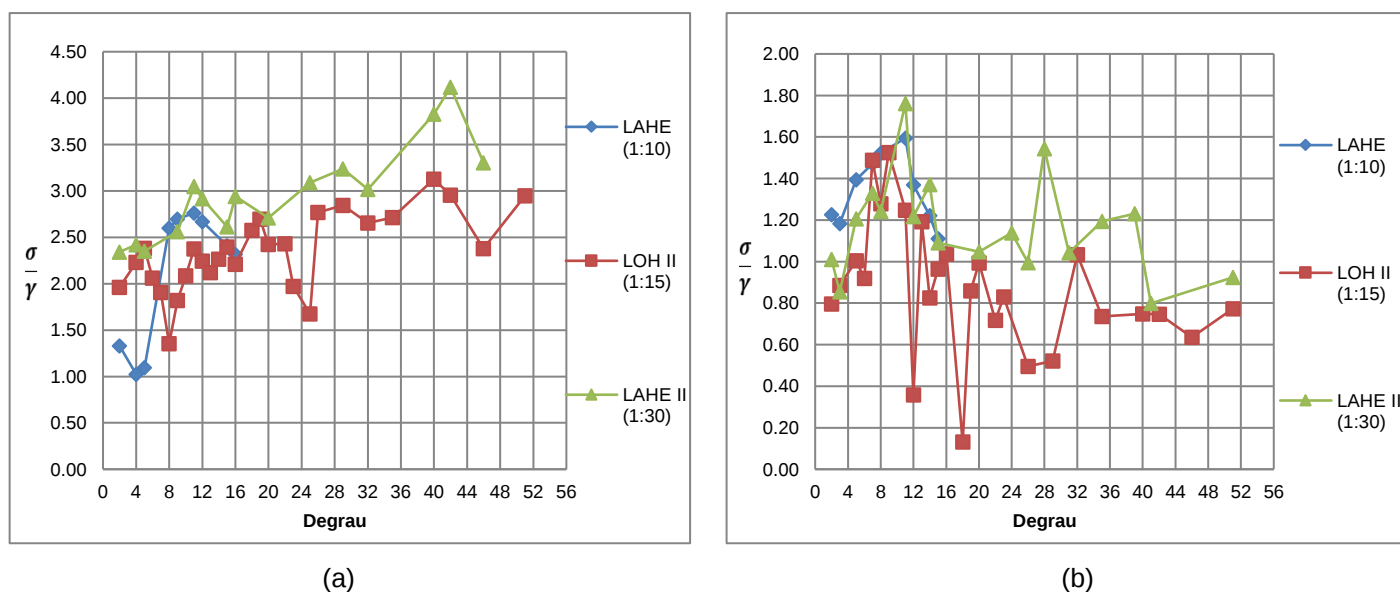


Figura 29 - Comparação do comportamento das flutuações de cargas de pressão, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Ao analisar a Figura 29 (a), identifica-se que os valores das flutuações de carga de pressão registrados nos patamares dos degraus dos modelos utilizados divergem em até 1,4m.c.a., para a condição de vazão equivalente de $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Nota-se que o modelo LAHE II apresentou valores de flutuações de carga de pressão maiores que aqueles obtidos pelos demais modelos. O

modelo LAHE, nos degraus 2, 4 e 5 apresentou valores inferiores aqueles registrados pelos modelos LAHE II e LOH II; posteriormente, após o degrau de número 8, os valores de LAHE passam a ser intermediários.

Para o espelho o mesmo comportamento se repete. O modelo LAHE II superestima as flutuações de carga de pressão enquanto o modelo LOH II as subestima. Ressaltando o modelo LAHE, que até o degrau de número 8 apresenta valores acima daqueles observados nos demais modelos, passa posteriormente a assumir valores medianos.

As maiores diferenças entre os modelos com relação as flutuações de carga de pressão nos espelhos dos degraus são da ordem de 1,0m.c.a.

A figura 30 traz a comparação entre os modelos, para a vazão equivalente de $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ dos valores de carga de pressão extrema mínima com probabilidade de não-excedência de 0,1%.

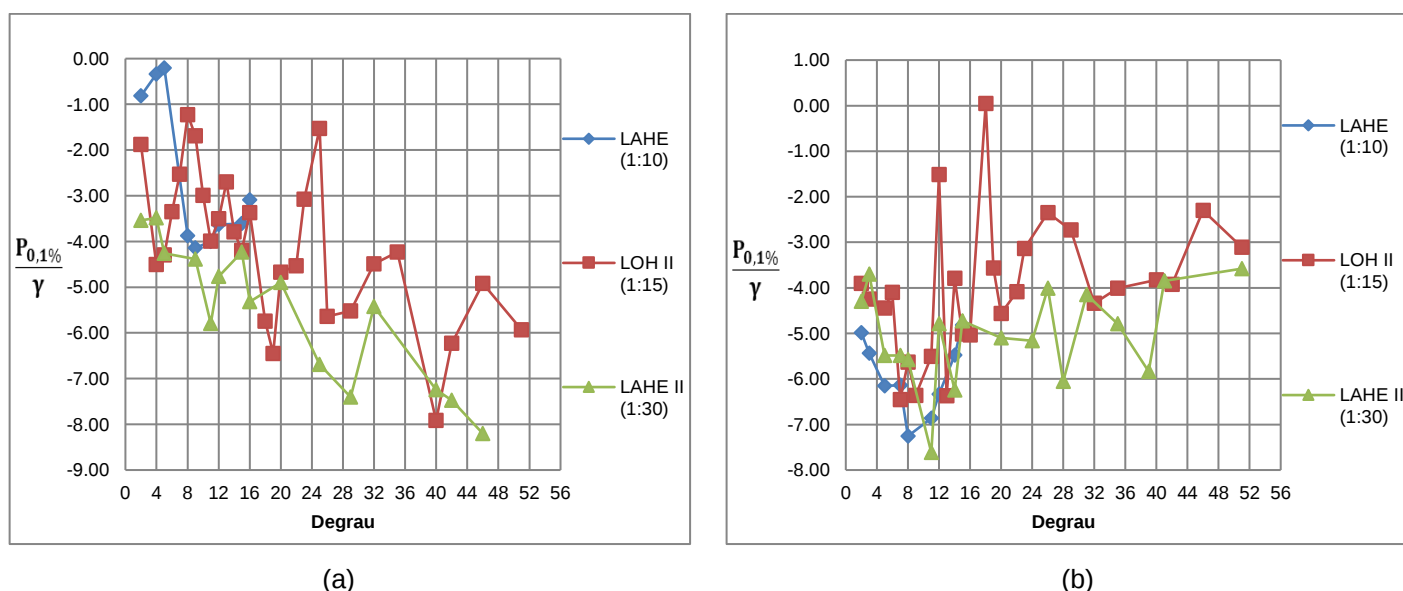


Figura 30 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 0,1%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Para os valores mínimos, observados no patamar dos degraus, identifica-se que o modelo LOH II apresenta os dados mais atenuados, ao longo da calha em degraus. Já o modelo LAHE II apresenta valores inferiores aos demais modelos. O modelo LAHE até o degrau de número 5 apresenta valores de pressão extrema maiores que o verificado nos demais modelos.

Logo após, passa a assumir valores entre aqueles verificados entre os modelos.

A maior diferença entre os valores de carga de pressão extrema mínima, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, nos patamares dos degraus, é de 5,2m.c.a.

No espelho o comportamento mantém-se similar, com exceção do modelo LAHE, que passa a assumir valores de carga de pressão extrema menores que os observados nos demais modelos, para os degraus mais de montante.

A maior diferença de estimativa da pressão extrema mínima entre os modelos é da ordem de 5m.c.a. No entanto, na maior parcela da calha as diferenças não ultrapassam a marca de 3,7m.c.a.

Na Figura 31 é apresentado o comportamento da estimativa das cargas de pressão extrema, com probabilidade de não-excedência de 99,9%.

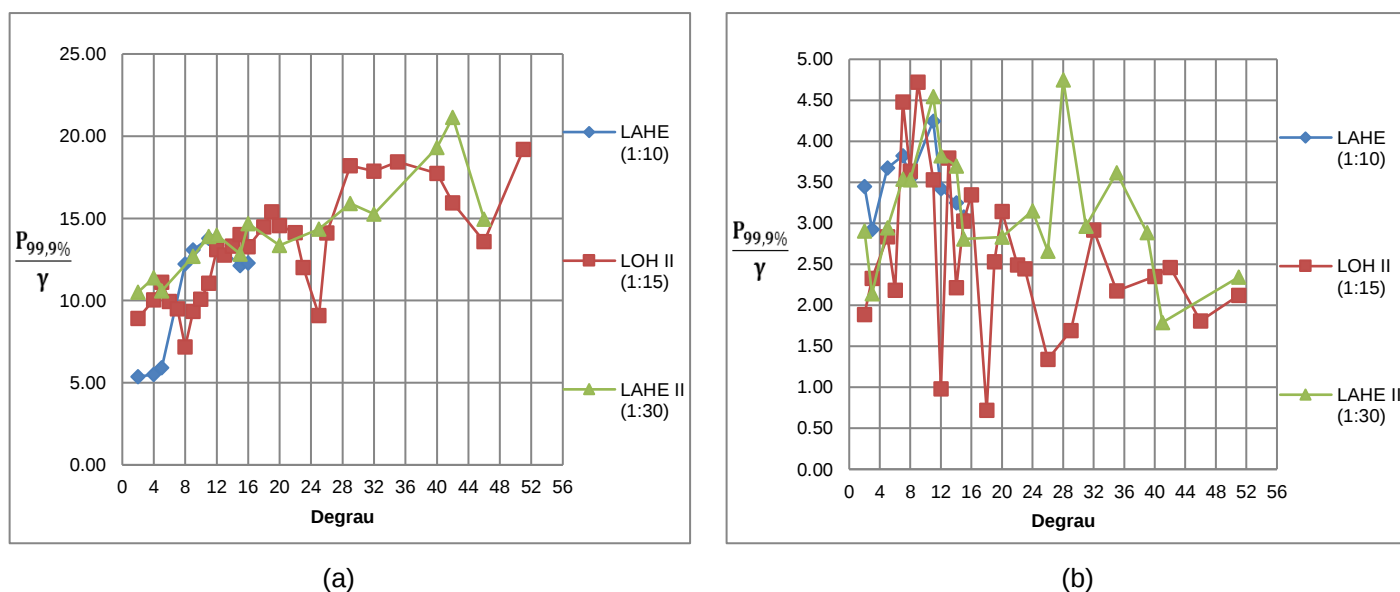


Figura 31 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 99,9%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Ao interpretar a figura 31 observa-se que o modelo LOH II traz resultados de cargas de pressão extrema máxima inferior ao verificado no modelo LAHE II, tanto para patamar quanto para o espelho dos degraus.

No patamar, os valores de carga de pressão extrema apresentam maior amplitude de variação do que aqueles observados nos espelhos. Ainda assim,

observa-se que o comportamento dos três modelos tende a convergir. O valor em módulo da máxima diferença verificada entre os modelos ao longo da calha é de 5,9m.c.a.

Já no espelho a máxima diferença entre as estimativas de cargas de pressão extrema, com probabilidade de 99,9% de não-excedência não ultrapassou a marca de 3,1m.c.a.

5.1.1.3 Vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Nesta seção são apresentados os resultados da comparação entre as diferenças observadas no comportamento das cargas de pressão ao longo da calha escalonada, para os modelos LOH II e LAHE II, sob a condição de vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, correspondente as vazões medidas de 200L/s no modelo LOH II e de 162,5L/s no modelo LAHE II.

Como já destacado anteriormente, no modelo LAHE a faixa de vazões ensaiadas no modelo não atingiu valores equivalentes, quando convertidos para a escala de protótipo, maiores que $11,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. A limitação das faixas ensaiadas respeitou a capacidade de cada modelo, a fim de se evitar o extravasamento do canal de montante.

A Figura 32 apresenta a comparação entre os valores de carga de pressão média verificados nos modelos LAHE II e LOH II utilizados nesta pesquisa, sob a condição de vazão equivalente de $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

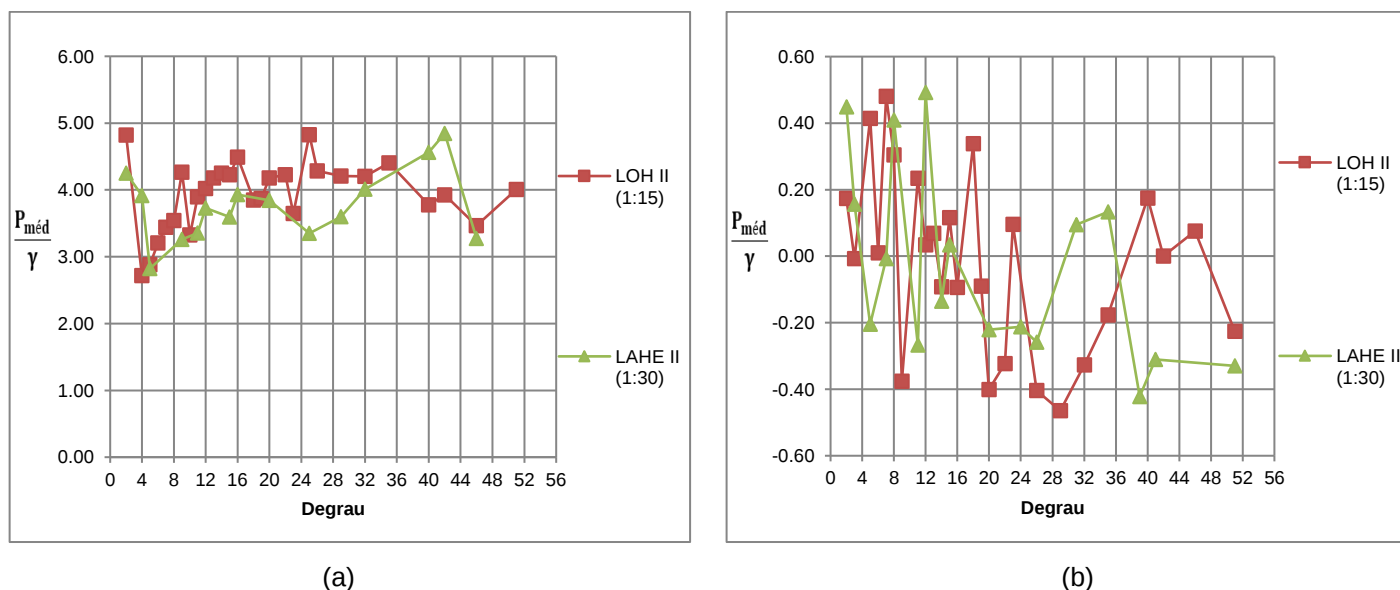


Figura 32 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Observa-se que no patamar, apenas valores positivos foram registrados nos dois modelos. Enquanto que nos espelhos, existe a presença de valores negativos para os dois modelos, ao longo da calha escalonada.

No patamar, o modelo LAHE II apresenta, quase que na integralidade do comprimento da calha, valores de carga de pressão inferiores aos observados no modelo LOH II. Porém, nos degraus de número 4, 40 e 42 ocorre o processo inverso entre os modelos.

A maior diferença observada entre os valores registrados no patamar nos dois modelos, quanto a carga de pressão média, é de 1,5m.c.a.

Já nos espelhos, não é possível indicar qual modelo tem a tendência a apresentar os maiores e/ou menores valores de carga de pressão média, visto que o comportamento longitudinal é bastante oscilatório, principalmente na porção não aerada do escoamento. Apesar da dificuldade em se determinar qualitativamente as características do escoamento, observa-se que a variação da amplitude dos valores de carga de pressão é menor, se comparada com os dados do patamar. A maior diferença entre os modelos na determinação da carga de pressão média é de 0,6m.c.a.

A Figura 33 apresenta as flutuações de carga de pressão registradas para o modelo LOH II e LAHE II.

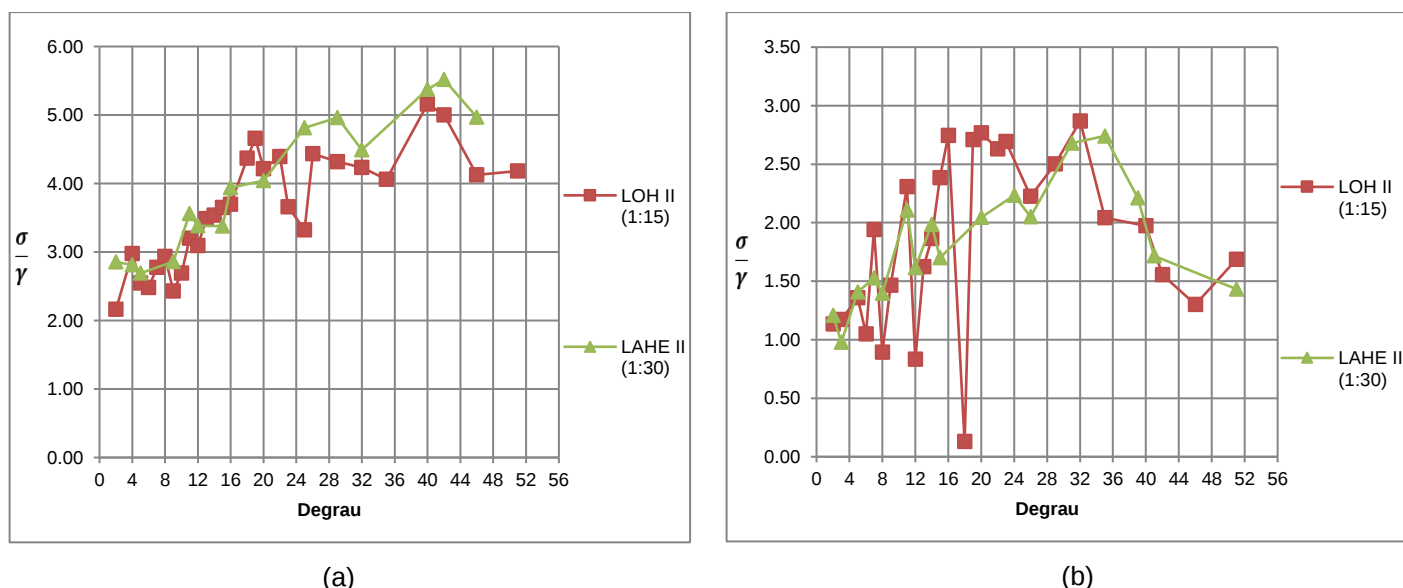


Figura 33 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

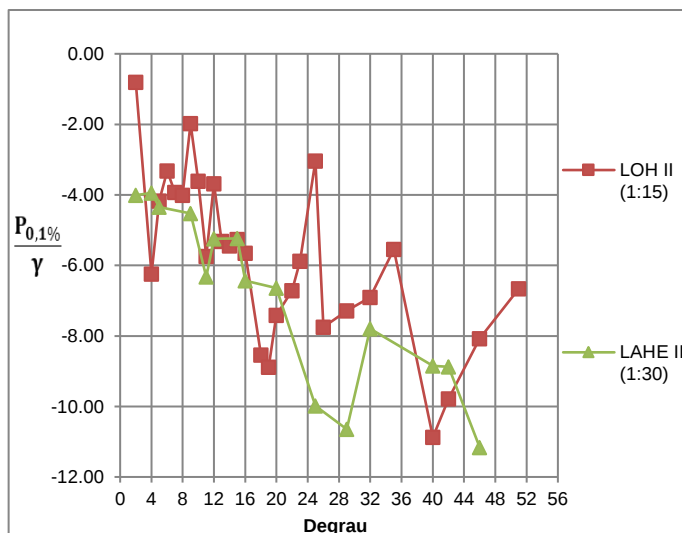
Até o degrau de número 21, no patamar, as flutuações de carga de pressão apresentam valores muito próximos, com diferenças inferiores a 0,5m.c.a. Cabe destacar que no primeiro degrau instrumentado, degrau de número 2, a diferença entre os modelos é de 0,7m.c.a.

A partir do degrau de número 21, observa-se que o modelo LAHE II apresenta valores de flutuação de carga de pressão superiores aqueles verificados no modelo LOH II. No degrau 25 observa-se a maior diferença entre as flutuações de carga de pressão entre os modelos, para o patamar, com valor próximo à 1,5m.c.a.

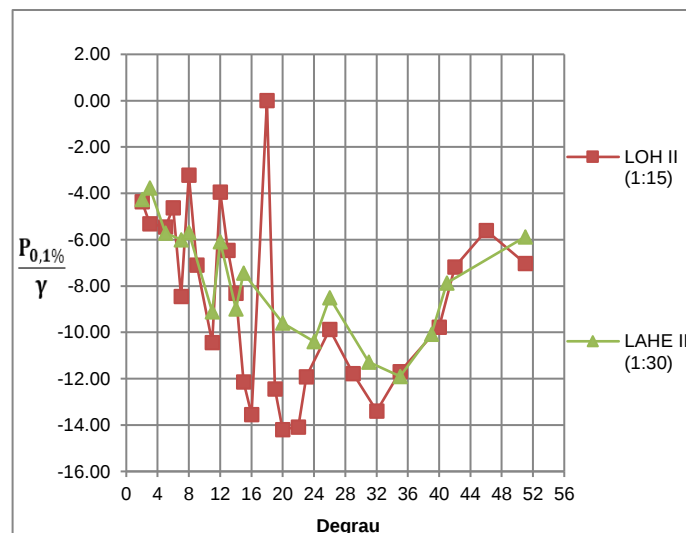
No espelho, como mostra a Figura 33 (b), a flutuação de pressão registrada no modelo LOH II apresenta oscilação ao longo do comprimento da calha escalonada, por vezes superando as flutuações de carga de pressão registrada no modelo LAHE II, em outras apresentando valores inferiores.

A maior diferença entre as flutuações registradas nos modelos, de 0,8m.c.a., encontra-se no degrau 12. Observa-se que na porção mais a jusante da calha, as flutuações de carga de pressão para o modelo LAHE II tornam-se ligeiramente maiores que aquelas verificadas no modelo LOH II.

A comparação entre as cargas de pressão extremas mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, observadas no modelo LOH II e LAHE II, para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ é apresentada na Figura 34. Nota-se que, tanto nos patamares quanto nos espelhos, apenas valores negativos são registrados.



(a)



(b)

Figura 34 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 0,1%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Ao analisar a Figura 34 (a) observa-se que, na grande maioria dos casos, as cargas de pressão extremas mínimas verificadas no modelo LOH II são superiores às do modelo LAHE II. Não incluem esta constatação os degraus de número 4, 18, 19, 20, 40 e 42.

No início da calha, a diferença na carga de pressão extrema mínima entre os modelos é de 3,2m.c.a., para o degrau de número 2. Já no degrau 25, identifica-se a maior diferença, com valor de 7m.c.a.

Para o espelho, assim como observado na Figura 34 (b), o modelo LOH II apresenta valores de carga de pressão extrema mínima que ultrapassam os registrados pelo modelo LAHE II, para valores inferiores e superiores. Por esta razão não é possível inferir qual o modelo, com base no comportamento da carga de pressão extrema mínima de 0,1%, tem a propensão a indicar valores negativos mais extremos. No entanto, deve-se atentar que quando convertido para a escala de protótipo os valores de carga de pressão passam a não ter sentido físico, pois o valor de carga de pressão é ainda menor que o ponto de vaporização da água. Sendo assim, com base nos valores convertidos para a escala de protótipo, é possível indicar que para as vazões específicas elevadas, iguais ou maiores que $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, existe o potencial risco de ocorrência de cavitação.

Na figura 34 (b) identifica-se ainda que o degrau de número 18 apresenta comportamento destoante em relação aos demais registrados no modelo LOH II, isso indica um possível erro na leitura do transdutor instalado no espelho, ou pode estar atrelada a ampla faixa de medição do instrumento utilizado.

A diferença máxima observada entre os modelos LAHE II e LOH II para a carga de pressão extrema mínima, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, considerando os degraus instrumentados, é de até 4,7m.c.a. No entanto, para os demais pares de pontos as diferenças entre os modelos não supera o valor de 2,5m.c.a.

A Figura 35 apresenta a comparação do desenvolvimento das cargas de pressão extremas com probabilidade de 99,9% de não-excedência para os modelos LOH II e LAHE II, sob condição de vazão equivalente.

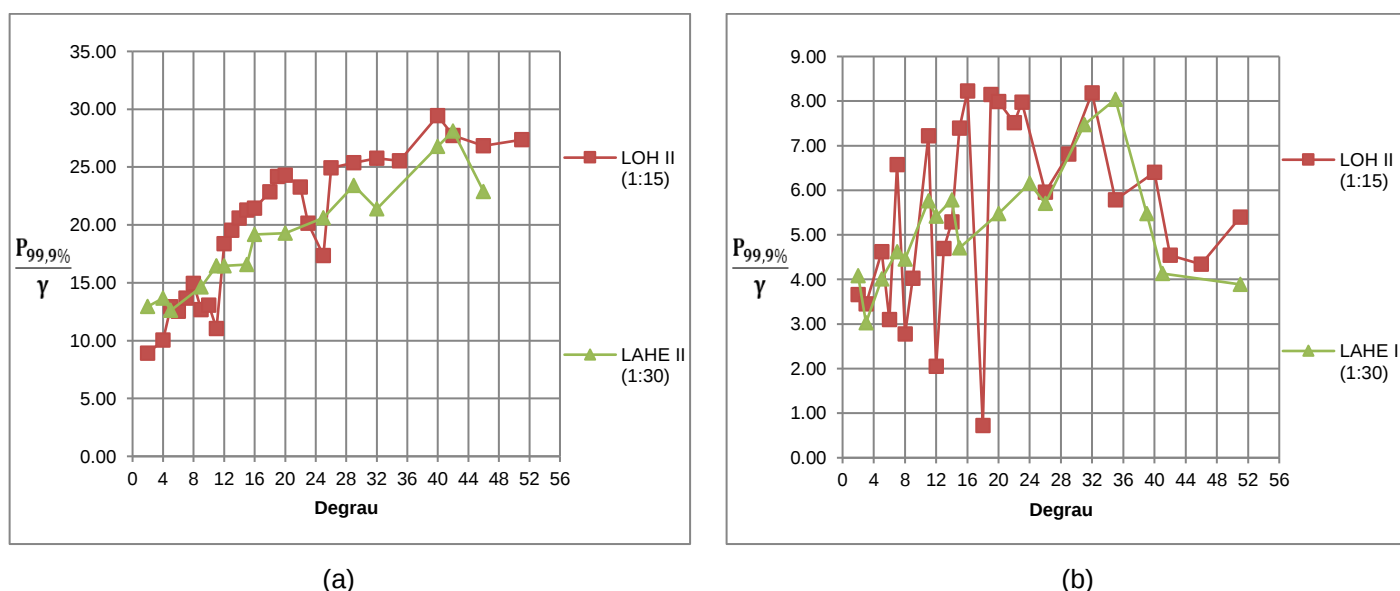


Figura 35 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extremas com Probabilidade de Não-Excedência de 99,9%, ao longo da calha escalonada, dos modelos LOH II e LAHE II para as vazões equivalentes com $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Identifica-se que as pressões extremas com probabilidade de 99,9% de não-excedência relacionam-se com os valores extremos máximos, em virtude da escala de valores de carga de pressão não apresentar resultados negativos. Outrossim, as pressões extremas com probabilidade de não-excedência expressam os valores de carga de pressão em que em 99,9% do conjunto de dados, os valores registrados serão menores ou iguais; indicando, assim, a estimativa de pressões extremas máximas.

Ao interpretar a Figura 35 (a) nota-se que a tendência do comportamento observado no modelo LOH II também é identificada no modelo LAHE II.

Para o patamar é possível identificar que, sem pormenorizar, o modelo LAHE II tende a apresentar maior volume de dados de carga de pressão extrema máxima ao longo da calha, com valores inferiores aqueles registrados pelo modelo LOH II.

No modelo LOH II o maior valor registrado de carga de pressão extrema máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% foi de 29,4m.c.a., para o patamar do degrau 40. Já para o modelo LAHE II o valor extremo máximo de carga de pressão observado foi de 28,1m.c.a., no degrau 42.

A maior divergência entre os modelos, para o patamar dos degraus, com relação ao valor de carga de pressão extrema máxima com probabilidade de não-excedência de 99,9% foi de 5,4m.c.a observado no degrau de número 11.

Para o espelho, o maior valor registrado no modelo LAHE II foi de 8,0m.c.a. no degrau 35; enquanto que, no modelo LOH II o maior valor registrado foi de 8,2m.c.a no degrau 16.

O confronto entre os valores de carga de pressão extrema máxima registrados nos espelhos dos modelos LOH II e LAHE II para a vazão equivalente de 23,2m³/s/m, identificou a maior diferença entre os modelos, para o mesmo número de degrau instrumentado, com valor de 3,4m.c.a., observado no degrau de número 12.

5.2 Análise adimensional das posições de início de aeração e das cargas de pressão

Buscando inferir sobre o possível efeito de escala observado entre os modelos LAHE, LOH II e LAHE II esta pesquisa recorreu a análise adimensional. Desta maneira, além da simplificação das análises, devido ao agrupamento das variáveis de interesse que afetam o comportamento do campo de pressão, a comparação torna-se mais ampla permitindo não apenas confrontar os resultados obtidos entre os modelos reduzidos adotados neste estudo, como também com aqueles verificados na literatura.

5.2.1 Posição de Início de Aeração

O primeiro grupo adimensional testado neste estudo relacionou a razão entre o comprimento da calha até o ponto de início de aeração e a rugosidade do degrau (L^*/k) com o número de Froude Rugoso (F^*).

A escolha em adotar este grupo adimensional na análise dos resultados está associada a facilidade em se obter tais informações, além da relevância direta que as variáveis exercem no escoamento em degraus.

A Figura 36 apresenta o emprego dos adimensionais para os conjuntos de dados dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II.

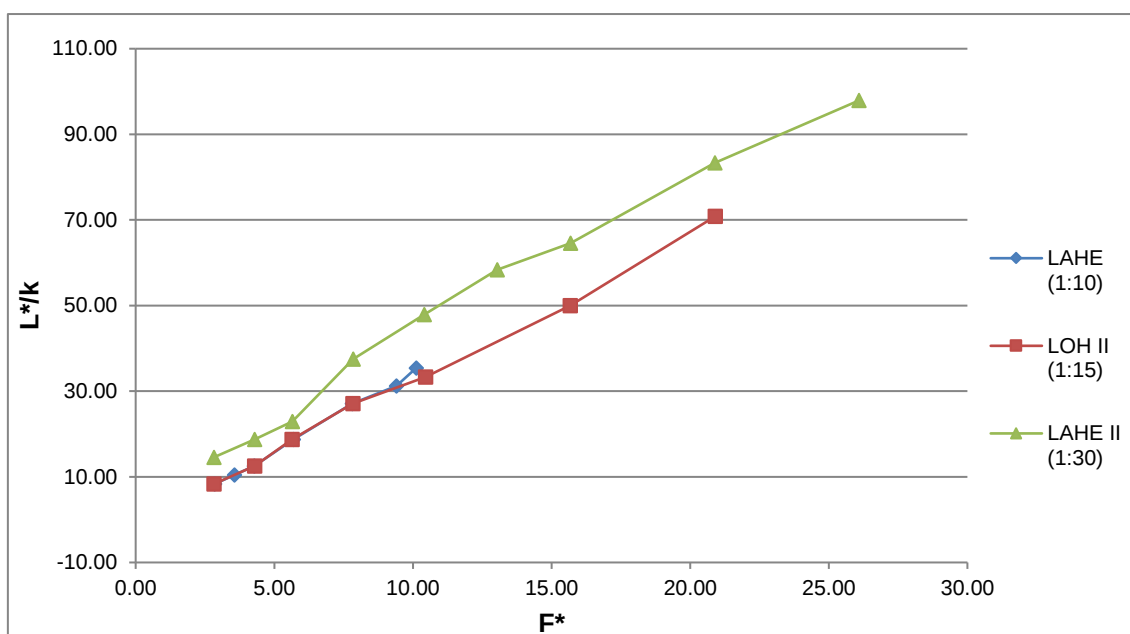


Figura 36 – Adimensional $L^*/K \times F^*$

Observa-se que o modelo LAHE II apresenta crescimento mais acentuado que os demais, com valores superiores àqueles registrados nos mesmos pontos para os outros modelos. Já os modelos LAHE e LOH II apresentam comportamento muito próximo, se sobrepondo em alguns pontos.

Ao verificar o número de Froude rugoso correspondente as vazões equivalentes, adotadas no tópico anterior (capítulo 5.1.1.), entre os três modelos e entre os modelos LAHE II e LOH II identifica-se que:

- Ao fixar o número de Froude rugoso igual a 2,8 percebe-se que modelo LOH II e LAHE apresentam o mesmo valor para o adimensional L^*/K , de 8,3. Isto indica que, além de estar analisando uma vazão equivalente o ponto de início de aeração ocorre no mesmo degrau, quando convertido para

escala de protótipo. Por outro lado, é evidente que o modelo LAHE II, apesar de acompanhar tanto em direção quanto na inclinação da reta os demais modelos, apresenta valor superior para o adimensional de L^*/K , de 14,5.

- O mesmo ocorre se avaliarmos as curvas, fixando o número de Froude rugoso com valor igual a 7,8; para LAHE e LOH II o valor de L^*/K é de 27 e para LAHE II de 37,5.
- Comparando o número de Froude rugoso de 20,9, apenas entre os modelos LOH II e LAHE II, observa-se novamente que o valor de LAHE II é superior para o adimensional L^*/K , de 83,3 contra 70,8 no modelo LOH II.

O segundo grupo adimensional avaliado neste estudo relaciona a razão entre o comprimento da calha até o ponto de início de aeração e a rugosidade do degrau (L_a/k), com o número de Froude rugoso (F^*). Esta mesma adimensionalização foi avaliada por Wood et al. (1983) aplicada em calhas lisas de vertedouros, como aponta Dai Prá (2004).

A diferença entre o grupo adimensional testado anteriormente, está no fato deste considerar, além do comprimento da calha, também o comprimento da ogiva até o ponto de início de aeração. Como a ogiva dos três modelos possui a mesma forma, tipo Creager, e suas dimensões terem sido reduzidas considerando o fator de escala de cada modelo, o comportamento das curvas permanece igual.

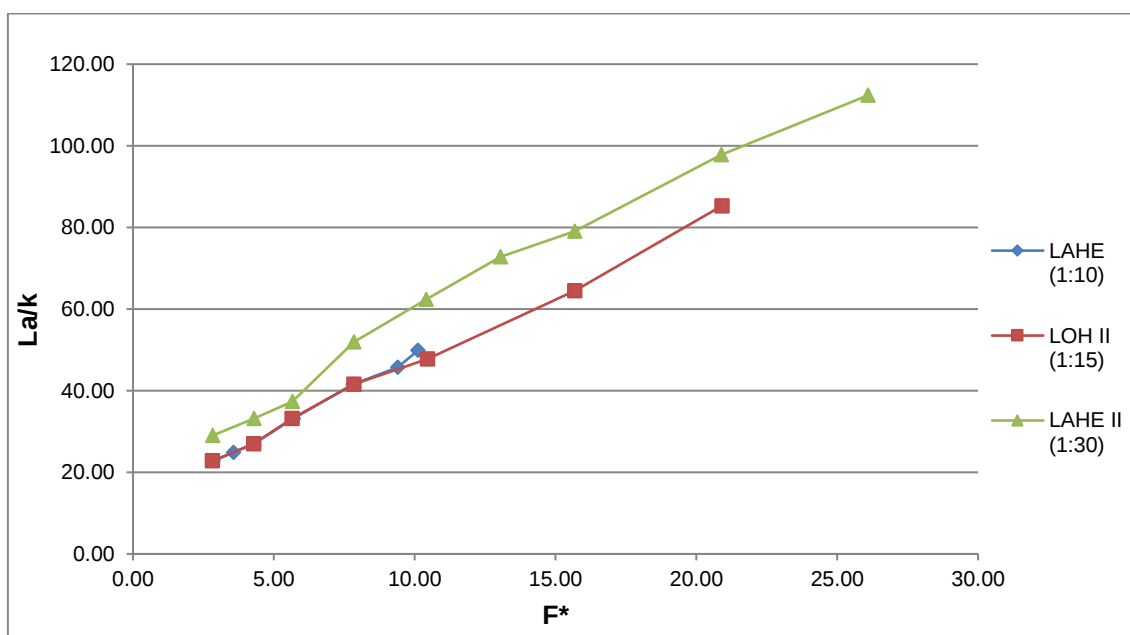


Figura 37 – Adimensional $L_a/K \times F^*$

Na Figura 37 constata-se que o gráfico é idêntico, quanto à forma, ao da Figura 36. As diferenças se dão exclusivamente no eixo das ordenadas, para os valores assumidos por L_a/K .

Explorando os mesmos valores de número de Froude rugoso, identifica-se que os valores de LOH II e LAHE se sobrepõem para $F^* = 2,8$ e para $F^* = 7,8$, com valor de 22,8 e de 41,5, respectivamente. Enquanto o modelo LAHE II assume os valores de 29 e de 51,9.

Para $F^* = 20,9$ o valor registrado no adimensional L_a/K para o modelo LOH II foi de 85,3 e para o modelo LAHE II de 97,8.

Sanagiotto (2003) adimensionalizou o comprimento do início da aeração em relação a rugosidade do degrau (L_a/k) em função do número de Froude rugoso (F^*). No seu estudo, a autora utilizou três modelos de vertedouros em degraus, com escala de 1:10, declividade de 1V:0,75 e alturas de degrau de 3, 6 e 9cm. Posteriormente, os comparou com os dados de outros autores.

A comparação realizada por Sanagiotto (2003) se deu com base na interpretação da Figura 38. A autora concluiu que seus resultados foram próximos aos identificados pelos demais autores, apresentando a mesma tendência.

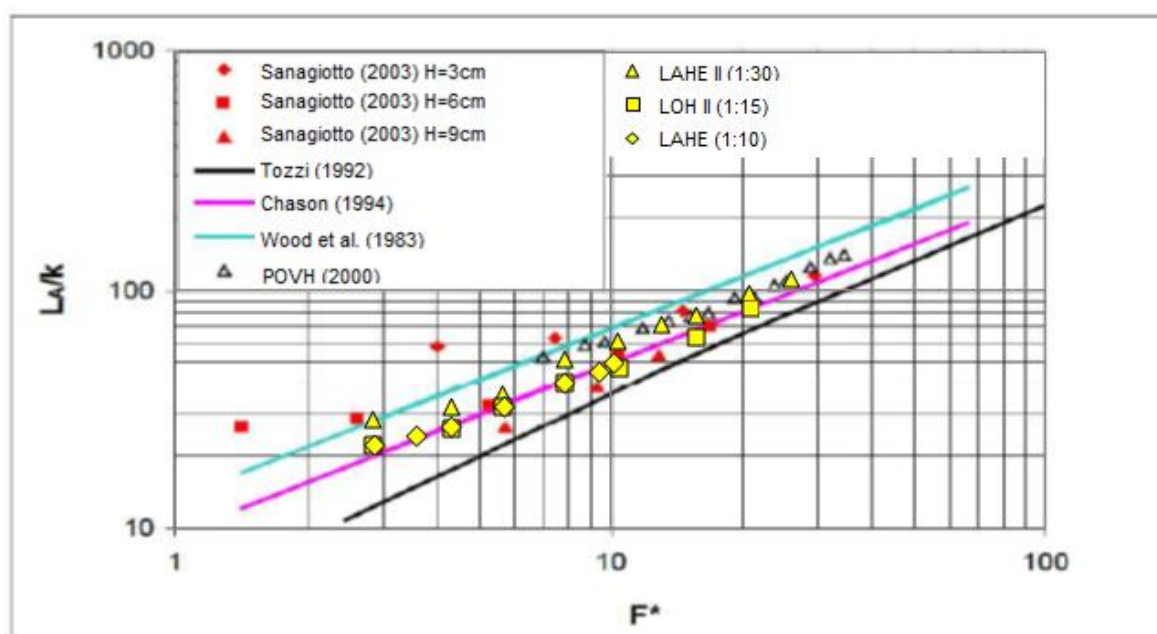


Figura 38 - Comparação da posição de início de aeração entre as os dados obtidos neste estudo com os de Sanagiotto (2003), as equações propostas por Tozzi (1992), Chason (1994), Wood et al (1983) e dos dados de POVH (2000). Fonte: Adaptado de Sangiotto (2003).

Wood et al. (1983) propuseram uma equação para o início da aeração em vertedouros com calhas de diferentes rugosidades, enquanto Tozzi (1992) realizou ensaios em modelos reduzidos de vertedouros em degraus com cinco diferentes rugosidades k (5, 10, 20, 30 e 60 mm), para vazões entre 34,4 e 201,4 L/s/m. Chanson (1994) analisou o início da aeração do escoamento com base em dados experimentais de outros pesquisadores, com declividades entre 27 e 52° e propôs um equacionamento para a determinação da posição de início de aeração. Já os dados de POVH (2000) indicam a posição de início de aeração total em um modelo com degraus de 2,4 cm de altura, declividade de 1V:0,75H, e com escala de redução de 1:25.

Observa-se pela Figura 38 que para o conjunto de dados desta pesquisa os valores adimensionais de início de aeração em relação a rugosidade dos degraus, em função do número de Froude rugoso concordam com os registrados na literatura.

Percebe-se ainda, que os dados de Sanagiotto (2003) para os degraus de altura de 9cm representam o mesmo protótipo hipotético que o deste estudo. Assim sendo, verifica-se que estes estão ainda mais próximos e encontram-se dentro das curvas propostas por Tozzi (1992), Chanson (1994) e por Wood et al. (1983).

Quanto a posição de início de aeração, é possível identificar, com base nos resultados apresentados neste tópico, que a divergência observada no modelo LAHE II em relação aos demais modelos, provêm do fato do ponto de início de aeração ocorrer em degraus mais a jusante da calha, em relação aos modelos LAHE e LOH II para condições de operação equivalentes.

Esta diferença indica que ao utilizar um modelo de tamanho menor (escala 1:30) a posição do início da aeração sofre influência da escala do modelo, fato que pode ser atribuído à redução da macrorrugosidade do degrau que faz com que a camada limite se desenvolva completamente em posição mais a jusante que a observada nos modelos de tamanho maior (escala 1:10 e 1:15), retardando o ponto de início de aeração.

5.2.2 Cargas de pressão ao longo da calha

O comportamento das cargas de pressão distribuídas ao longo da calha escalonada também foi adimensionalizado. Neste capítulo os resultados obtidos a partir do emprego do coeficiente de pressão (CP) e do adimensional de pressão ζ são apresentados. As posições longitudinais foram adimensionalizadas por S' , como também, de modo adicional, por L/L_a .

A seguir, uma descrição qualitativa e quantitativa é apresentada.

5.2.2.1 Distribuição Longitudinal dos Coeficientes de Pressão (CP)

A Figura 39 apresenta, a título de exemplo, o comportamento do Coeficiente de Pressão (CP) – equação 15, ao longo da posição na calha em degraus relativa à posição de início de aeração (S') – equação 16, para o modelo LAHE II.

$$CP = \frac{P}{\frac{\gamma}{v^2} \frac{1}{2g}} \quad \text{Equação (15)}$$

$$S' = \frac{(L - L_a)}{h_a} \quad \text{Equação (16)}$$

Nota-se que o coeficiente de pressão (CP) avaliou as cargas de pressão médias obtidas nos patamares e nos espelhos do modelo LAHE II, apresentando-os para toda a gama de vazões ensaiadas.

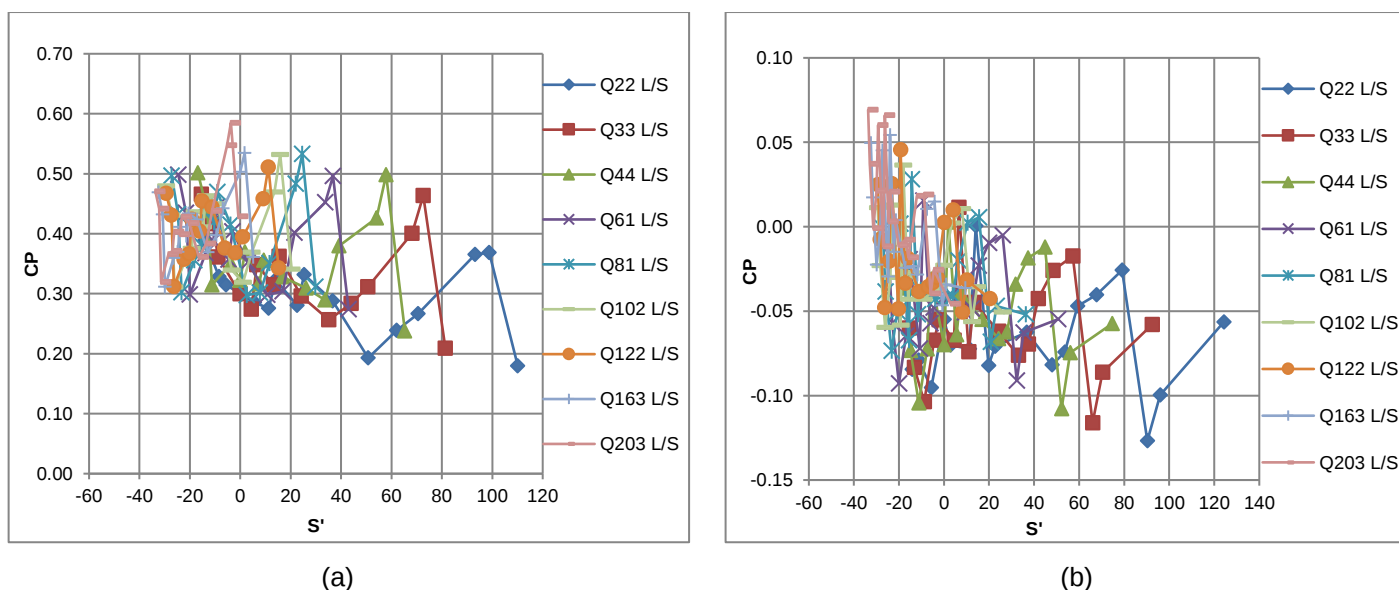


Figura 39 – Comportamento dos coeficientes de pressão médias no modelo LAHE II no (a) Patamar e (b) Espelho

Na figura 39 (a) identifica-se que o comportamento dos dados tem a mesmo padrão de distribuição, independentemente da vazão ensaiada. No entanto, percebe-se que longitudinalmente as maiores vazões apresentam-se mais concentradas em relação às menores, com menor variação de S' . O agrupamento de valores de S' negativos evidenciado nas maiores vazões ocorre pelo fato do degrau de início de aeração ser observado em posições mais a jusante da calha.

Cabe destacar que valores positivos de S' ($S' > 0$) representam posições a jusante do ponto de início de aeração, na porção aerada do escoamento, enquanto valores negativos de S' ($S' < 0$) representam posições situadas na região não aerada do escoamento, a montante do ponto de início de aeração.

Já no eixo das ordenas é possível identificar que os valores de CP diminuem para as vazões menores. Isto se confirma ao comparar o pico observado entre a vazão de 203L/s, que resultou em um valor de $CP=0,58$, em $S'=-3,7$, contra aquele visto para a vazão de 22L/s de $CP=0,37$, em $S'=98,8$. A mesma constatação é válida para os espelhos dos degraus, como mostra a Figura 39 (b).

Nos Apêndices D, E e F o comportamento dos dados adimensionalizados pelo coeficiente de pressão CP e pelo adimensional de posição longitudinal S' são expostos para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II, respectivamente. Cabe destacar, que além das cargas de pressão média, encontram-se os gráficos gerados com as flutuações de carga de pressão, e pressões extremas ($P_{0,1\%}$ e $P_{99,9\%}$).

5.2.2.2 Comparação dos Coeficientes de Pressão entre os modelos físicos reduzidos

Uma vez que o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito de escala a partir de três modelos físicos distintos, buscou-se avaliar conjuntamente os valores de CP, na intenção de buscar um comportamento padrão ou característico. A Figura 40 tem por objetivo apresentar, dentro do conjunto global de dados mensurados em cada modelo as principais divergências existentes entre os modelos.

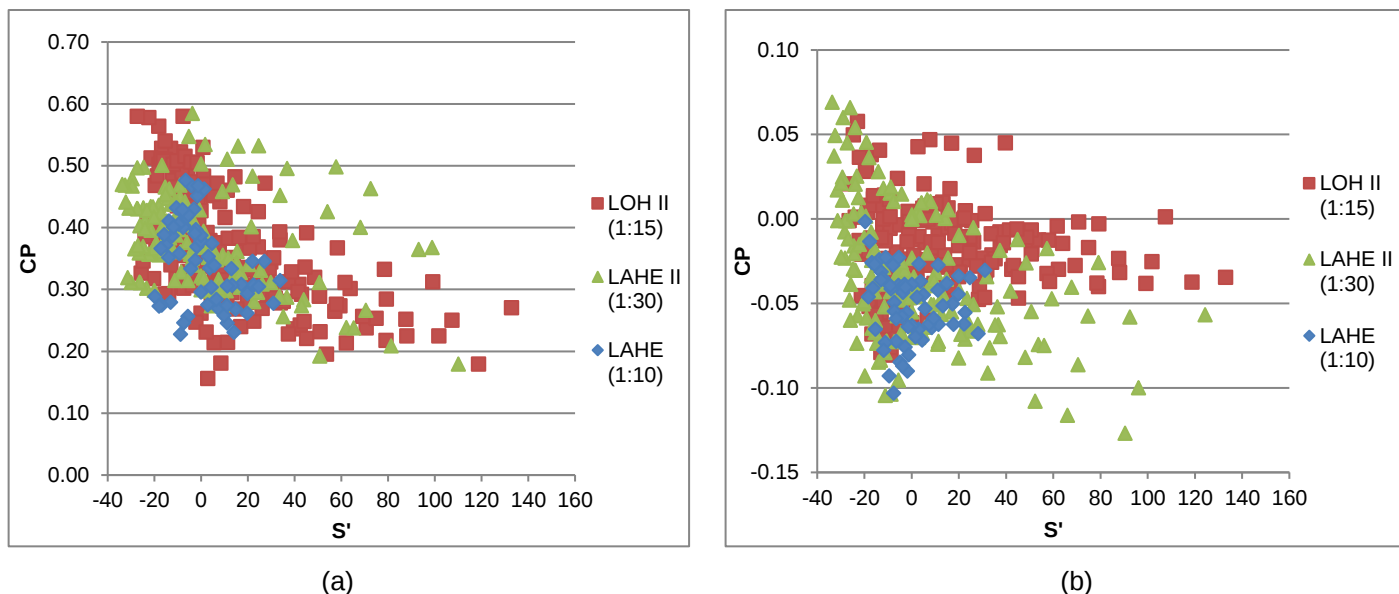
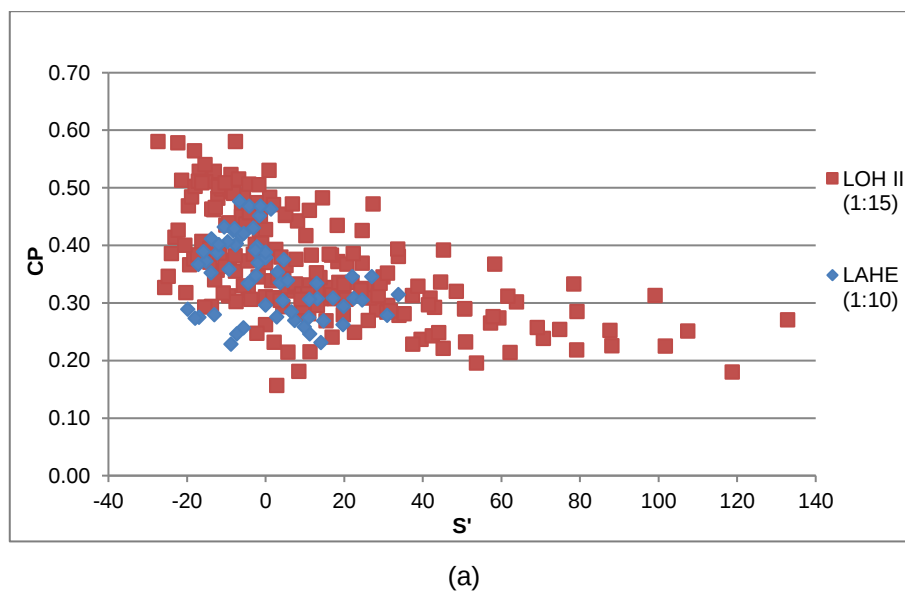
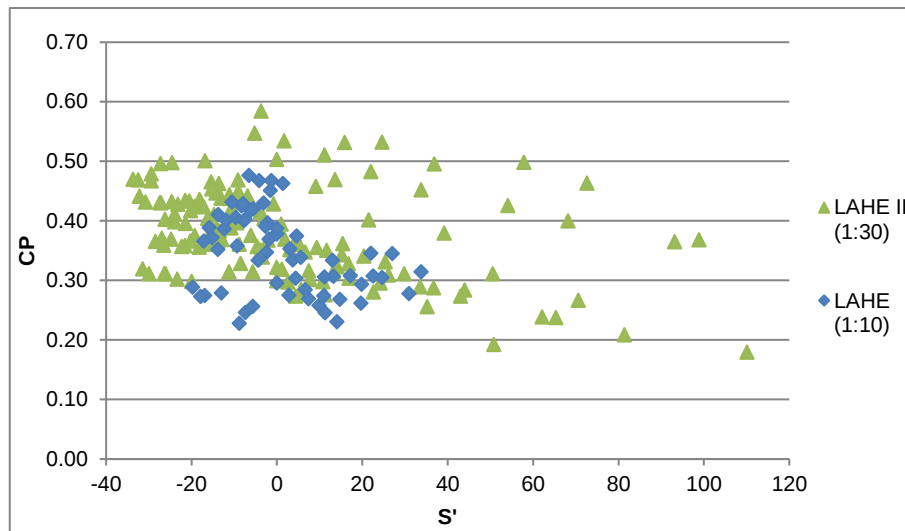


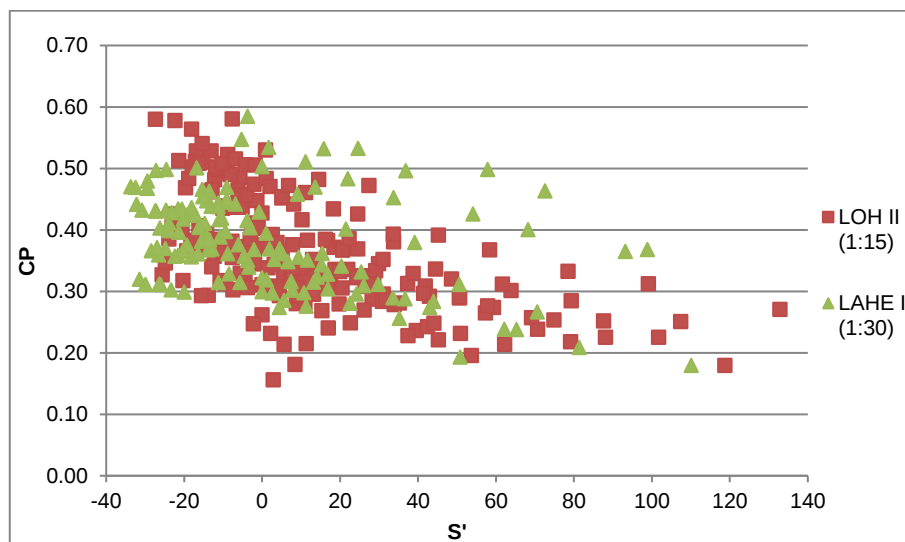
Figura 40 - Comportamento das cargas de pressão média, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas por C_p e S' no (a) Patamar e (b) Espelho.

Ao analisar a Figura 40 (a) nenhum comportamento padrão ou mesmo divergências entre os modelos podem ser identificadas, dado o fato desta figura apresentar um volume de informações muito grande. Com a finalidade de facilitar a identificação dos dados um recorte é apresentado na Figura 41, na qual estão apresentados os coeficientes de pressão média (C_p) obtidos nos patamares dos degraus.





(b)



(c)

Figura 41 - Comparação entre as cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S', no patamar dos modelos (a) LOH II x LAHE, (b) LAHE II x LAHE, e (c) LOH II e LAHE II

Através da Figura 41 identifica-se que o comportamento é bastante semelhante entre todos os modelos, especialmente na região não aerada do escoamento ($S' < 0$). Observa-se que na região a jusante do ponto de início de aeração ($S' > 0$) os valores de CP obtidos no modelo LAHE II são maiores que nos demais modelos. Isso indica que a incorporação de ar difere entre os modelos, com consequência nos valores de carga de pressão registrados e, portanto, no adimensional de pressão CP.

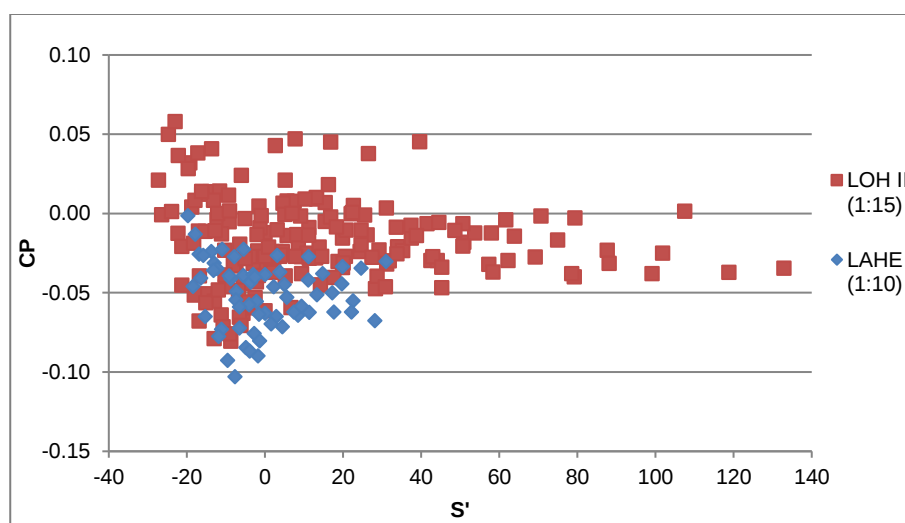
No patamar é possível identificar que quanto maior o fator de escala empregado ($\lambda=30$), ou seja, menor o tamanho do modelo, maiores são os valores de CP. Isto ocorre devido, possivelmente, as influências dos efeitos de

escala, pois modelos com escala muito pequena podem ter a introdução de ar afetada.

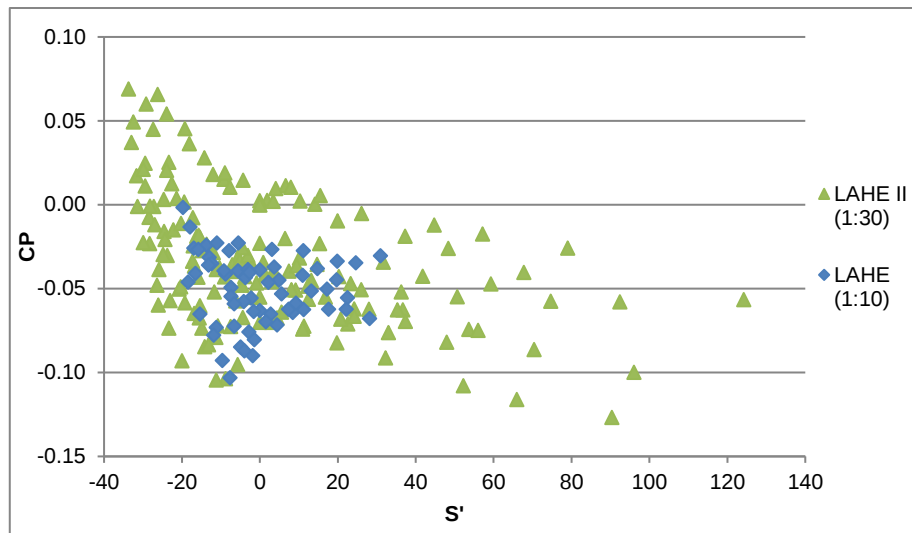
De modo análogo, a Figura 42 expressa a comparação entre os modelos de modo mais detalhado, para os espelhos. De acordo com a Figura 42 (a), apesar dos modelos LAHE e LOH II compatibilizarem da mesma tendência de comportamento, para uma grande gama de valores de CP, o modelo LOH II apresenta valores ligeiramente superiores àqueles registrados pelo modelo LAHE. A justificativa deste fenômeno pode estar associada a menor incorporação de ar evidenciada em modelos com escala menor.

Nos espelhos, o modelo LAHE II apresenta valores com maior magnitude de CP que os observados no modelo LAHE, conforme mostra a Figura 41 (b). Estes valores máximos representam as elevadas vazões ensaiadas no modelo LAHE II (de 288L/s, 345L/s e 409L/s), em que não há correspondência com as ensaiadas no modelo LAHE.

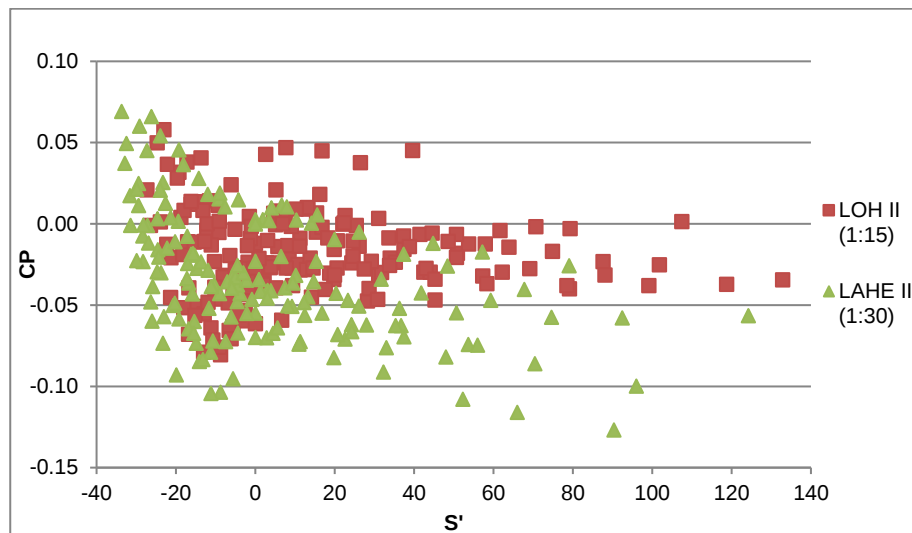
Ao passo que, se comparados com aqueles verificados no modelo LOH II, como apresenta a Figura 41 (c), o modelo LAHE II subestima os valores de CP. Cabe destacar que os valores máximos de CP, próximos a 0,05, observados no modelo LOH II para as posições adimensionais de 0 a 40, podem estar associados a um problema de medição identificado no espelho do degrau 18. Especialmente para as posições mais a jusante da calha (zona aerada do escoamento) identifica-se que o modelo LAHE II registrou valores de carga de pressão menores que aquelas do modelo LOH II, devido a deficiente incorporação de ar.



(a)



(b)



(c)

Figura 42 - Comparação entre as cargas de pressão médias adimensionalizadas por CP e S' , obtidas no espelho dos modelos (a) LOH II x LAHE, (b) LAHE x LAHE II, e (c) LOH II e LAHE II.

Como já dito anteriormente, aqui apenas a comparação entre as cargas de pressão média entre os modelos foram apresentadas, seguidas de uma breve argumentação. No Apêndice G são encontrados os gráficos do comportamento adimensionalizado por CP e S' para as demais cargas de pressão entre os modelos.

5.2.2.3 Comparação dos coeficientes de pressão para vazões equivalentes

Segundo o mesmo critério adotado na interpretação do comportamento longitudinal das cargas de pressão, nesta seção serão apresentadas as

comparações dos valores por CP e S', entre os modelos utilizados neste estudo, sob a condição de vazões equivalentes.

5.2.2.3.1 Vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Para tentar inferir sobre o efeito de escala envolvido na determinação das cargas de pressão, a análise adimensional torna-se uma grande ferramenta, pois desta maneira as grandezas envolvidas na estimativa das variáveis são suprimidas.

A Figura 43 apresenta o resultado obtido após confrontar os coeficientes de pressão médios (CP) para os três modelos físicos de escala reduzida utilizados neste estudo.

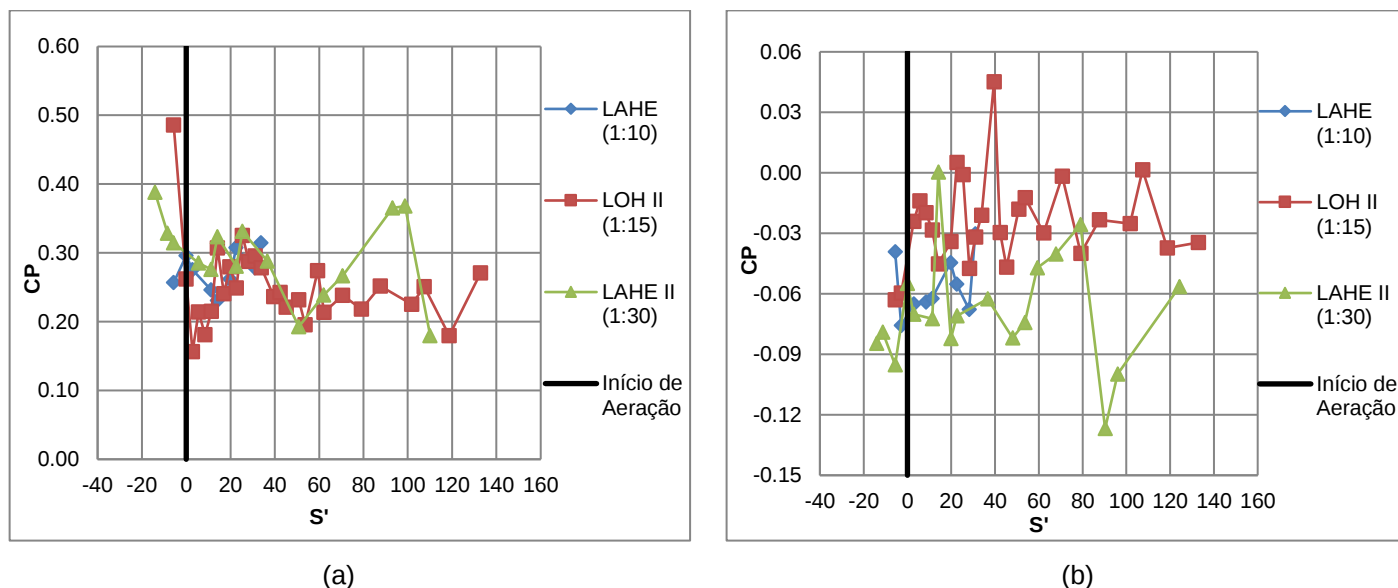


Figura 43 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Ao analisar a calha a montante do ponto de início de aeração, nota-se que as diferenças entre os valores de CP registrados nos patamares dos modelos apresentam grande divergência. No ponto onde $S'=-5$ a maior diferença registrada nos valores de coeficiente de pressão médio (CP) entre os modelos é de 0,23.

Nas proximidades do ponto de início de aeração, em $S'=0$, os valores de CP são praticamente idênticos, se aproximando de 0,30.

A jusante da posição de início de aeração os valores de CP apresentam comportamento semelhante entre os modelos, com pequenas diferenças.

Entretanto, identifica-se que o modelo LAHE II tende a apresentar valores de CP superiores que os observados nos demais modelos para as posições mais próximas ao final da calha escalonada.

Para os patamares a maior diferença global verificada entre os valores de coeficiente de pressão médio nos modelos foi de 0,2 identificada no início da calha.

A mesma exploração estende-se para o espelho dos degraus, no qual tem seu comportamento apresentado na Figura 43 (b). É possível identificar que na região montante a posição de início de aeração o modelo LAHE II apresenta valores menores de CP quando comparado com aqueles verificados nos demais modelos. A máxima diferença identificada na porção não aerada do escoamento entre os valores de coeficiente de pressão médio é de 0,06.

No ponto de início de aeração, coincidente com o ponto de afloramento da camada limite, as diferenças entre os valores de CP registrados entre os espelhos dos modelos reduzem a valores próximos a 0,03. Enquanto na porção aerada do escoamento, região mais a jusante da calha, nota-se que o modelo LAHE II apresenta valores de CP inferiores aos observados nos demais modelos, principalmente para as posições mais próximas ao final do comprimento da calha escalonada. A máxima diferença entre os valores de CP nos espelhos dos modelos é de 0,1 sendo verificada na porção final do comprimento da calha escalonada, para $S'=90$.

Assim, percebe-se que para os patamares não existe a influência de efeitos secundários evidentes na comparação entre os valores de CP nos modelos para a vazão de $3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$. Por outro lado, nos espelhos identifica-se que o modelo LAHE II tende a subestimar os valores de CP se comparado com os modelos LOH II e LAHE.

Verificando os coeficientes adimensionais de flutuação de pressão (CP_σ), apresentados na Figura 44, observa-se que para o patamar o comportamento entre os modelos LAHE e LOH II é aproximado. Sendo que nos espelhos, como mostra a Figura 44 (b), os modelos LAHE e LAHE II apresentam maior semelhança.

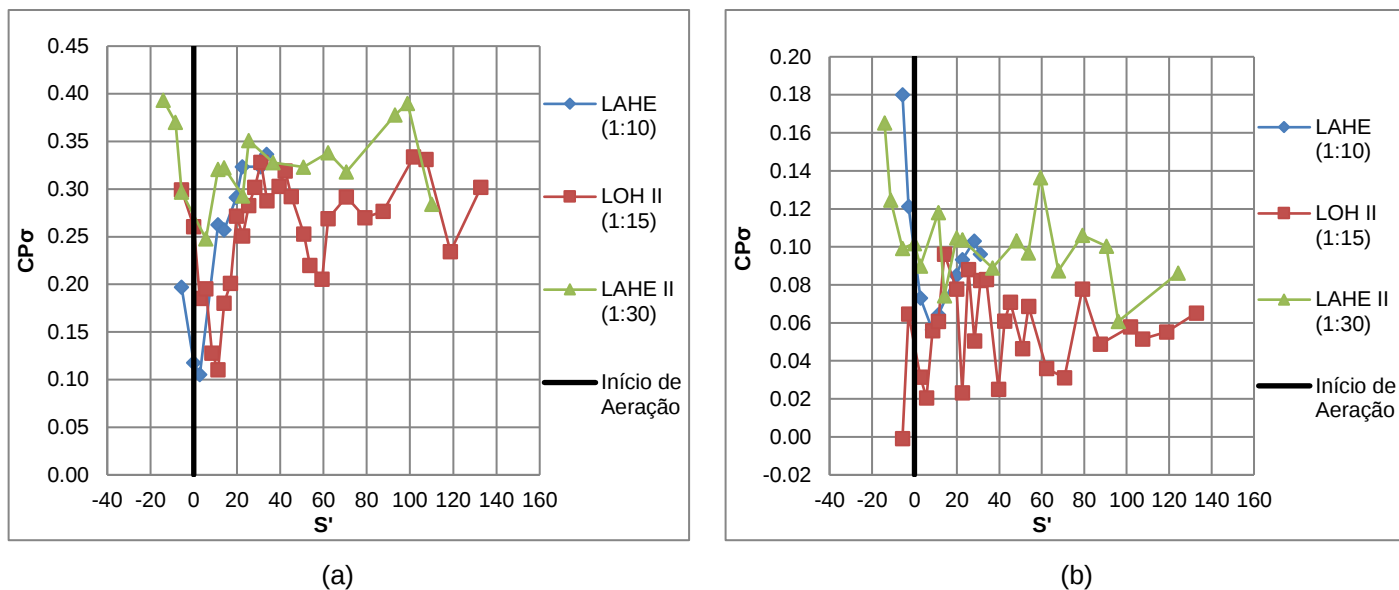


Figura 44 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Para os patamares, na posição anterior ao ponto de início de aeração observa-se que o modelo LAHE II registra valores de CP_σ mais elevados que os observados nos demais modelos. Para esta mesma região de análise, identifica-se que o modelo LAHE apresenta os menores valores de CP_σ . A máxima diferença registrada nos valores de coeficientes de pressão flutuantes é de aproximadamente 0,1 em $S'=-5$.

No ponto de início de aeração, as diferenças entre os modelos aumentam para a marca de 0,14. Já para posições a jusante do início de aeração, identifica-se que o modelo LAHE II apresenta valores de CP_σ maiores, ao passo que o modelo LOH II registra o comportamento inverso, com valores de CP_σ menores. Ao longo da calha a diferença chega a valores de 0,21 para $S'=11$.

Nos espelhos observa-se que na porção não aerada existe uma grande diferença entre os comportamentos dos valores de CP_σ registrados nos modelos. Nos degraus situados a montante do ponto de início de aeração, o modelo LOH II apresenta valores inferiores aos verificados nos modelos LAHE e LAHE II, com diferença de 0,18 para $S'=-5$. No ponto de início de aeração as diferenças tendem a reduzir para valores próximos a 0,05. Ao longo da calha escalonada, para as posições situadas a jusante do ponto de início de aeração, o modelo LAHE II predominantemente apresenta valores de CP_σ maiores que

os observados nos demais modelos, enquanto o modelo LOH II registra valores de coeficiente de pressão flutuante menores.

Desta maneira identifica-se que, de modo geral, o modelo LAHE II tem tendência a apresentar valores de CP_{σ} mais elevados, principalmente na zona aerada. A razão deste comportamento pode ser associada ao fato de que em modelos de tamanho menor a incorporação de ar possa ser afetada, e assim, as oscilações de pressão (flutuações) não são amortecidas. Enquanto que em modelos de tamanho maior, onde a entrada de ar no escoamento ocorre a taxas mais elevadas, ocorre a atenuação das oscilações de pressão nas cavidades dos degraus.

A adimensionalização das cargas de pressão extremas mínimas ($CP_{0,1\%}$) é apresentada na Figura 45. O modelo LAHE II exprime valores menores que os observados nos outros modelos, enquanto o modelo LOH II tem valores de maior magnitude; sendo este padrão verificado nos patamares e espelhos.

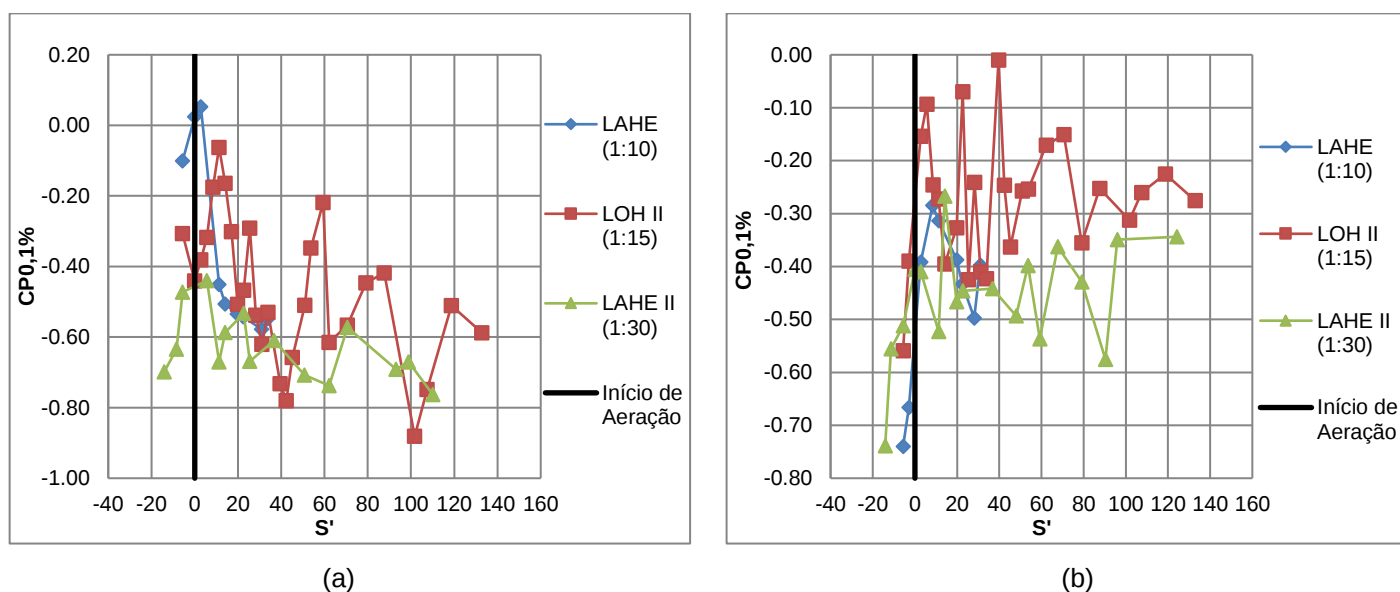


Figura 45 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.

Avaliando os coeficientes de pressão extremos mínimos com probabilidade de não-excedência de 0,1% registrados nos patamares, observa-se que:

- Na seção não aerada do escoamento, uma grande distinção é verificada entre os valores de $CP_{0,1\%}$ registrados nos modelos reduzidos. O

modelo LAHE II apresenta valores menores, com registro de valores de CP0,1% negativos, enquanto que o modelo LAHE apresenta valores maiores que aqueles verificados nos demais modelos. A máxima diferença verificada nos valores de CP0,1% nos patamares dos modelos para a região montante a posição de início de aeração é de 0,38 para $S'=-5$.

- Na posição de início de aeração, onde o adimensional de posição longitudinal (S') assume valor igual a 0, a máxima diferença entre os modelos é de 0,46. No ponto em análise o modelo LAHE apresenta valores superiores e positivos aos verificados nos demais modelos.
- Para posições a jusante do ponto de início de aeração, observa-se que o modelo LOH II apresenta, majoritariamente, valores de CP0,1% mais atenuados que aqueles verificados no modelo LAHE II. A maior diferença verificada nos patamares dos modelos é de aproximadamente 0,6 em $S'=11$.

Nos espelhos dos modelos reduzidos para CP0,1%, com vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, verifica-se que:

- Para a região não aerada, o modelo LAHE tende a apresentar valores menores que nos demais modelos; em oposição, o modelo LOH II apresenta valores de CP0,1% mais atenuados. Diferenças da ordem de 0,35 são verificadas para $S'=-5$.
- No ponto em que ocorre a introdução natural de ar, o modelo LAHE continua a registrar valores de CP0,1% menores que o apresentado nos demais modelos. No entanto, a divergência entre os modelos reduz para valores aproximados de 0,25.
- Para as posições em que ocorre aeração do escoamento, o modelo LOH II apresenta valores mais atenuados, enquanto o modelo LAHE II indica valores menores. A maior divergência verificada entre os modelos tem magnitude de CPP0,1%=0,4 em $S'=39$.

A partir dos resultados apresentados é possível identificar que quanto aos valores de coeficiente de pressão extremo mínimo, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, o modelo LAHE II apresenta valores de CP0,1% inferiores em ambas as faces dos degraus. Isto remete a condição mais extrema, porém mais favorável em relação a segurança das estruturas.

Nos patamares, apesar de se observar diferenças entre os valores de CP0,1% registrados entre os modelos, ao longo do desenvolvimento do comportamento das cargas adimensionalizadas de pressão extremas mínimas, não se identificam diferenças significativas e que levem a suspeita de efeitos de escala. Já nos espelhos, ao comparar os valores de CP0,1% registrados nos modelos LOH II e LAHE II é razoável sugerir que efeitos de escala possam influenciá-los.

Nos espelhos dos degraus os valores de CP0,1% são muito sensíveis a incorporação de ar no escoamento, pois os valores carga de pressão extremo mínimo são muito pequenos. Assim, modelos de menor dimensão podem apresentar maiores interferências, visto que os valores registrados podem ser mais extremos pelo fato de não haver a atenuação por efeito da entrada de ar.

Para as pressões mais extremas positivas, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, conforme Figura 46, a maior diferença entre os valores de coeficiente de pressão extremo (CP99,9%) registrados na análise adimensional foi de 0,89 em $S'=11$ para o patamar.

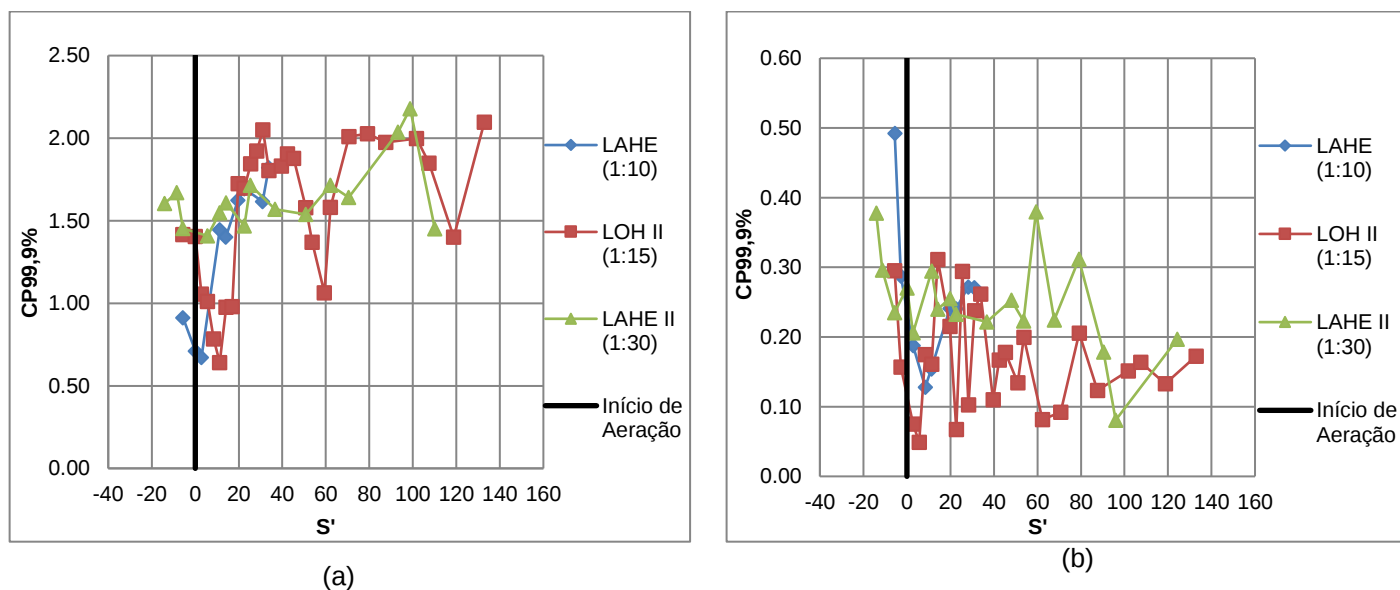


Figura 46 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema máxima, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Mantendo a análise comparativa do comportamento dos valores de CP99,9% nas mesmas regiões que as verificadas nas demais informações de carga de pressão, observa-se que para os patamares, na posição a montante do ponto de início de aeração o modelo LAHE II apresenta valores de CP99,9%

maiores que os identificados nos demais modelos e o modelo LAHE apresenta os menores valores. As diferenças registradas entre os valores dos coeficientes de pressão extrema máxima são de até 0,54 para $S'=-5$.

No ponto de início de aeração a diferença entre os modelos tende a aumentar até valores próximos de 0,69. Destaca-se que na posição onde ocorre a entrada de ar o modelo LAHE II apresenta valores de CP99,9% maiores, ao passo que o modelo LAHE tem valores menores.

Na região aerada, nota-se que o modelo LOH II apresenta valores mais elevados que os registrados nos demais modelos. Em contrapartida, o modelo LAHE II indica valores de CP99,9% menores. Ressalta-se que na posição $S'=60$ este comportamento é invertido.

Nos espelhos, a máxima diferença entre os coeficientes de pressão extremos com probabilidade de não-excedência de 99,9% foi registrada em $S'=59$ com valor de 0,25.

No ponto anterior ao início de aeração o modelo LAHE apresenta valores de CP99,9% mais elevados que os observados nos modelos LAHE II e LOH II. A diferença é de 0,26.

No ponto onde ocorre a entrada de ar as diferenças entre os modelos é reduzida a valores de 0,15. A partir deste ponto, na parte aerada da calha, o modelo LAHE II apresenta valores de CP 99,9% mais altos e o modelo LOH II valores menores.

No comportamento geral, é razoável admitir que nos patamares efeitos significativos de escala não são observados para a vazão de $3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ para CP99,9%. Já nos espelhos, nota-se que o modelo LAHE II superestima os valores de CP99,9% e que o modelo LOH II os subestima.

5.2.2.3.2 Vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Nesta seção serão verificadas as diferenças entre os valores adimensionais CP para a condição de vazão equivalente, correspondente a vazão específica em escala de protótipo de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Como já apresentado no tópico anterior, os coeficientes de pressão utilizar-se-ão de dados de carga de pressão média, flutuantes e extremas (P0,1% e P99,9%).

Cabe destacar que os efeitos de escala entre os modelos empregados serão associados as diferenças máximas verificadas, observadas no mesmo valor do adimensional de posição longitudinal (S').

Seguindo a mesma abordagem apresentada no tópico anterior (5.2.2.3.1), quanto ao procedimento estruturado para obtenção das comparações das maiores diferenças, aqui serão apenas apontadas as maiores divergências observadas no patamar e no espelho.

A Figura 47 traz a comparação entre os coeficientes de pressão médios dos modelos estudados, para patamar e espelho.

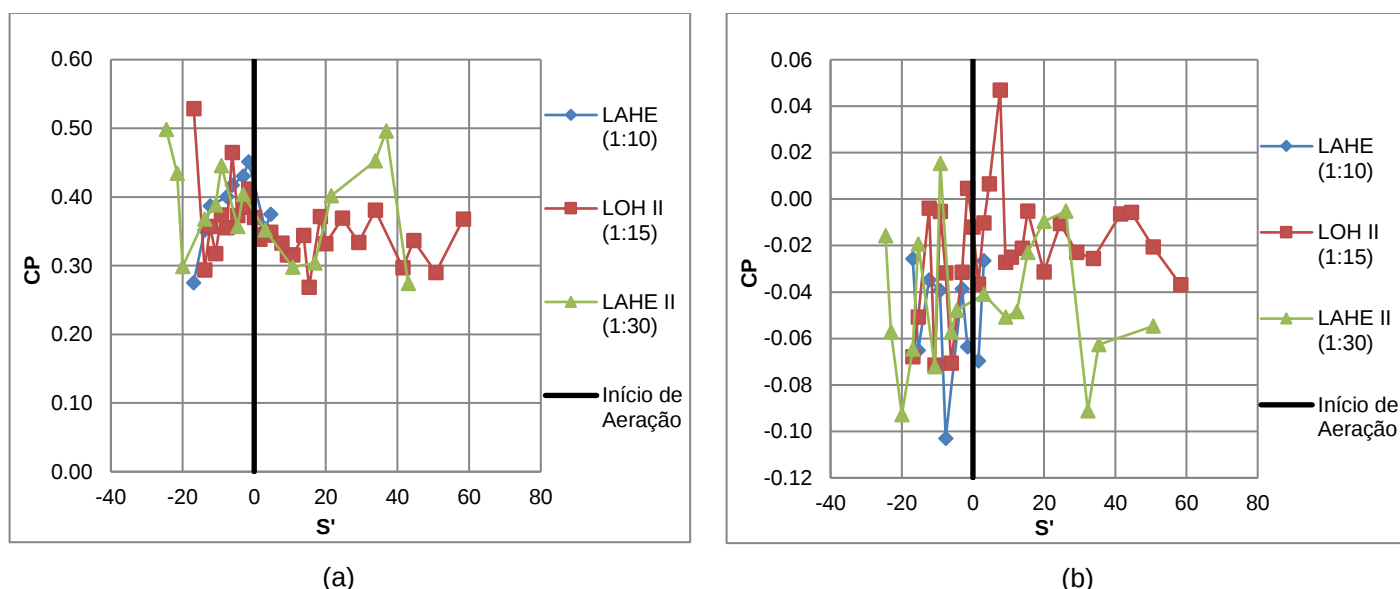


Figura 47 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Na Figura 47 observa-se que para as vazões mais elevadas, correspondentes a vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, uma maior concentração de valores de CP atrelados a S' com valores menores que zero é observado. Como já apontado, este fato se dá em função de que para as maiores vazões o ponto de início de aeração ocorre em posições mais a jusante da calha.

Identifica-se, a partir da Figura 47 (a) que a maior diferença identificada nos patamares entre os modelos tem magnitude de 0,26 sendo esta observada na posição longitudinal adimensional de número -17, inserida na região não aerada do escoamento.

Na região a montante do ponto de início de aeração observa-se que o modelo LOH II registra valores de CP inferiores aos observados nos demais modelos, enquanto os modelos LAHE e LAHE II além de apresentarem valores maiores não divergirem significativamente em relação aos valores registrados de CP para os mesmos S'.

No ponto onde ocorre a entrada de ar, o valor de CP registrado no modelo LAHE é maior que os verificados nos outros modelos. Neste mesmo ponto os modelos LOH II e LAHE II registram valores de CP idênticos. A diferença máxima verificada entre os três modelos é extremamente pequena, da ordem de 0,05.

Na porção a jusante do ponto de início de aeração os modelos LAHE II e LOH II tem comportamento semelhante até o ponto onde nas posições mais próximas ao final da calha, com valores de S' superiores a 20, nota-se que o modelo LAHE II passa a registrar valores mais elevados.

Para os espelhos, na porção a montante do ponto de início de aeração, os modelos LOH II e LAHE II apresentam semelhança no comportamento da distribuição dos valores de CP para as posições longitudinais. O modelo LAHE destoa dos demais modelos, indicando valores de CP menores. Nesta região, as maiores diferenças verificadas entre os modelos é de até 0,08.

No ponto onde ocorre a entrada de ar no escoamento, o modelo LOH II indica valores de CP superiores aos identificados nos demais modelos, enquanto o modelo LAHE registra valores menores. A variação das diferenças entre os valores de CP registrados entre os modelos reduz para cerca de 0,05.

Nas posições a jusante do ponto de início de aeração, o modelo LOH II apresenta valores de coeficiente de pressão médio mais atenuados para os espelhos, do que os verificados no modelo LAHE II. Conforme mostra a Figura 47 (b), a maior diferença de CP entre os modelos atinge a marca de 0,88 em S'=7.

Nos patamares, após a descrição da distribuição dos valores de CP em relação ao adimensional de posição identifica-se que para as posições mais a jusante da calha o modelo LAHE II tende a apresentar valores de CP superestimados.

Para os espelhos, apesar da amplitude entre as diferenças de CP verificadas entre os modelos ser menor, observa-se uma clara divergência no comportamento dos dados. Assim como observado na vazão menor, de $3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, o modelo LAHE II tende a apresentar valores de CP menores, quanto mais a jusante da calha se observa.

A comparação do comportamento dos coeficientes de pressão flutuantes, registrados na vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ é apresentada na Figura 48, para os patamares e espelhos dos modelos reduzidos.

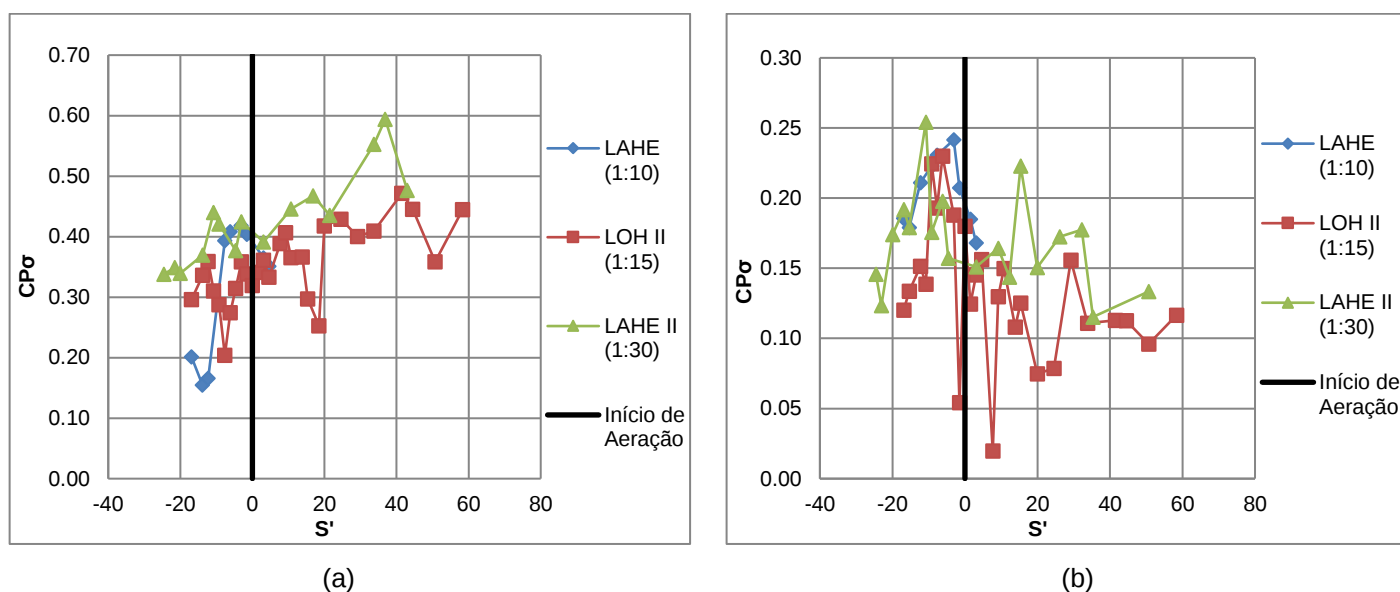


Figura 48 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.

Avaliando a porção não aerada do escoamento, observa-se que o modelo LAHE apresenta valores de CP_σ menores que os demais modelos para posições com valores de S' menores ou iguais a -12. Nesta mesma porção inicial da calha, o comportamento dos valores de CP_σ registrados por LOH II e LAHE II são semelhantes. Diferenças da ordem de 0,22 são verificadas entre os valores de CP_σ registrados entre os modelos, para $S'=-14$.

Contudo, ainda na região não aerada, a medida que se avalia os pontos que se aproximam do início de aeração, nota-se que o modelo LOH II tende a apresentar valores de CP_σ menores e que o comportamento do modelo LAHE passa a ser similar ao de LAHE II. Esta mesma constatação é identificada no ponto onde ocorre a incorporação de ar no escoamento, para $S'=0$.

Para as posições a jusante do ponto de entrada de ar os modelos LAHE II e LOH II tem comportamento oposto nos patamares, com o modelo LAHE II apresentando valores mais elevados.

Nos espelhos, como mostra a Figura 48 (b), diferenças abruptas no comportamento dos valores de CP_{σ} são verificadas entre os modelos. Na porção não aerada do escoamento, para valores de S' menores ou iguais -11, o modelo LOH II indica valores de CP_{σ} menores que os observados nos demais modelos. Nesta mesma porção da calha, os modelos LAHE e LAHE II apresentam comportamento semelhante, com valores de coeficiente de pressão flutuantes maiores. Ao passo que se analisa as posições longitudinais adimensionalizadas em direção ao ponto de início de aeração, constata-se que o modelo LAHE apresenta valores de CP_{σ} maiores que os registrados nos demais modelos.

Na posição de início de aeração as diferenças entre os valores de CP_{σ} são reduzidas para faixa inferior a 0,05.

Para as posições a jusante do ponto de início de aeração observa-se que o modelo LAHE II registra maiores valores de coeficiente de pressão flutuantes, em comparação com o modelo LOH II.

Tanto nos patamares quanto nos espelhos observa-se que os valores de CP_{σ} registrados no modelo LOH II apresentam pontos destoantes em relação a distribuição do comportamento, possivelmente provenientes de erro de medição. Assim, não é possível indicar se no modelo LOH II efeitos de escala possam ter influenciado as análises comparativas entre os valores de CP_{σ} .

A comparação entre os coeficientes de pressão extremos mínimos, com probabilidade de não-excedência de 0,1% para vazão de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, é apresentada na Figura 49.

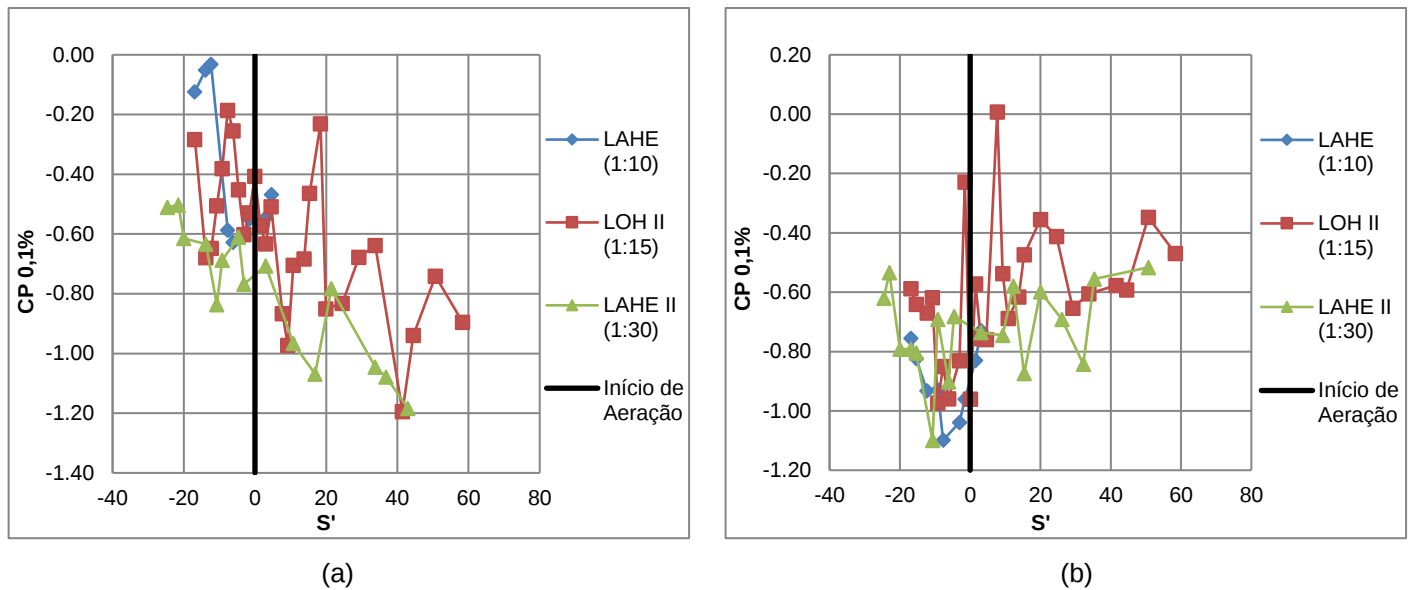


Figura 49 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, adimensionalizadas por CP e S', para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s/m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Observa-se que o modelo LAHE II registra valores extremos mínimos adimensionais menores que os identificados nos outros modelos, para os patamares dos degraus, na região não aerada do escoamento. Para valores de S' menores ou iguais a -12 o modelo LAHE indica os valores de CP0,1% maiores e a diferença observada entre os modelos chega ao valor de 0,62.

Para valores maiores de S', entre -12 e o ponto onde se observa o início de aeração (S'=0), o modelo LOH II registra os maiores valores de CP0,1%. Nesta configuração, a maior diferença entre os modelos é de 0,47 e verificada em S'=-7. No ponto onde ocorre a incorporação de ar a diferença dos valores de CP0,1% se reduz a 0,34.

Na região aerada do escoamento, o modelo LAHE II apresenta valores adimensionais de carga de pressão extrema mínima inferiores àquelas verificadas no modelo LOH II.

Para os espelhos, na região não aerada uma grande divergência entre os valores de CP0,1% registrados nos modelos é observada. Por esta razão a análise precisa ser dividida em sub-regiões. Para valores de S' menores ou iguais a -10, os valores de CP0,1% registrados no modelo LAHE II são subestimados, enquanto que o modelo LOH II os atenua. Entre a região não aerada limitada entre valores de S' maiores que -10 e o ponto de início de aeração (S'=0) o modelo LAHE passa a apresentar valores menores de

CP0,1% que aqueles verificados nos demais modelos. A maior diferença verificada na porção montante ao ponto de início de aeração entre os modelos é de 0,73 na posição de $S'=-1,5$.

No ponto onde se observa a incorporação de ar no escoamento, o modelo LOH II registra valores menores de CP0,1% em relação aos demais modelos. Apesar da alteração no padrão observado entre os modelos, em $S'=0$ a diferença entre os valores de CP0,1% é de 0,25.

A jusante do ponto de início de aeração observa-se que o modelo LAHE II registra valores menores de CP0,1%. A maior variação de CP0,1% nos espelhos, para a região aerada é de 0,74 na posição $S'=8$.

Assim como identificado no comportamento dos coeficientes de pressão flutuantes verificados nos espelhos dos degraus, para vazão de $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, observa-se que apesar das diferenças verificadas na porção mais a jusante da calha, o modelo LOH II possivelmente apresenta influência de erros provenientes de falha do equipamento de aquisição de dados, para as posições adimensionais de $S'=-1,5$ e de $S=7,7$.

A Figura 50 apresenta os valores de CP99,9% registrados nos modelos físicos, para a vazão equivalente de $8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

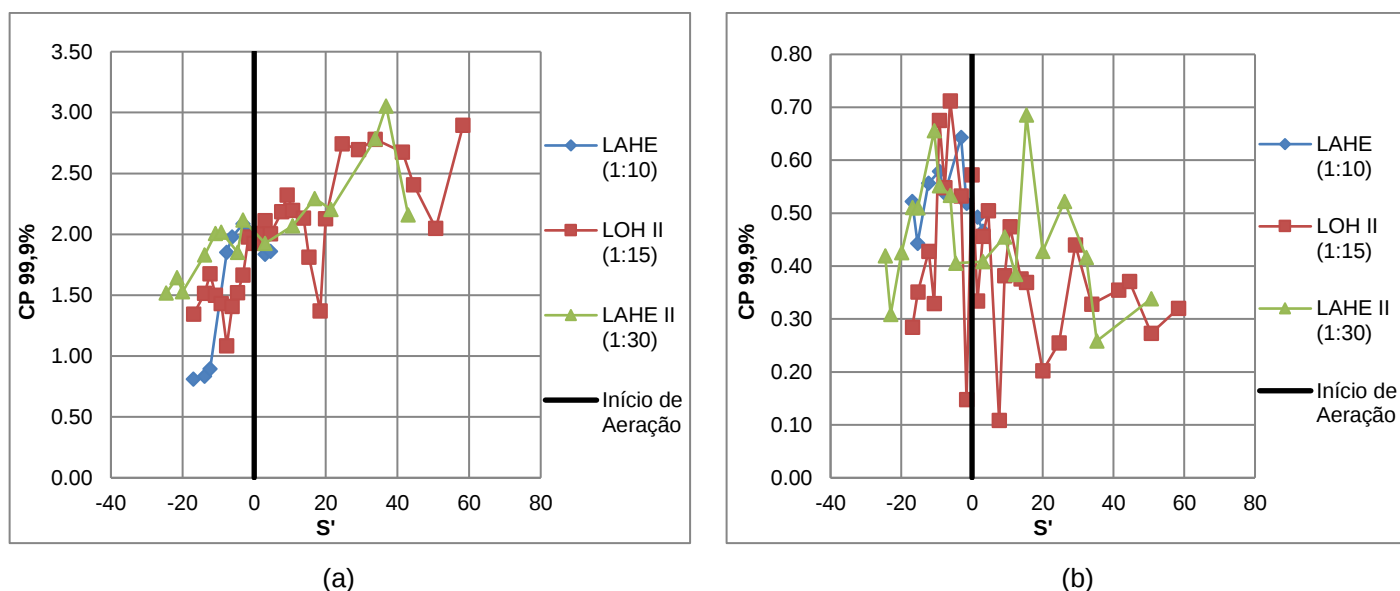


Figura 50 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema máximas, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Para os patamares, Figura 50 (a), os valores de CP99,9% máximos são verificados na região não aerada do escoamento pelo modelo LAHE II. Nos

pontos mais a montante ao início de aeração, com S' inferiores a -12, o modelo LAHE registra valores de CP99,9% menores. A partir deste ponto, o modelo LOH II passa a apresentar a característica de indicar valores extremos máximos menores. O coeficiente de pressão com 99,9% de probabilidade de não-excedência registrou diferenças na ordem de 1,0 nas posições longitudinais adimensionais de -14 e de -12.

No ponto de início de aeração os valores de CP99,9% registrados pelos três modelos convergem para a marca de 1,9, sem diferenças significativas.

Na porção aerada do escoamento observa-se comportamento semelhante entre os modelos LOH II e LAHE II, este último apresentando a tendência de indicar valores extremos máximos maiores.

Ao analisar a Figura 50 (b) nota-se que nos espelhos, apesar da menor amplitude dos valores assumidos por CP99,9%, o comportamento entre os modelos apresenta grandes oscilações.

Para a região não aerada do escoamento, os modelos LAHE e LAHE II apresentam valores de CP99,9% mais elevados e próximos; enquanto o modelo LOH II registra valores de CP99,9% mais atenuados. Ressalva-se que para os valores de S' entre -6 e -9, o modelo LOH II apresentou valores extremos máximos superando os valores de CP99,9% dos demais modelos.

No ponto de início de aeração a diferença entre os valores de CP99,9% registrados entre os modelos é inferior a 0,15. Nesta posição, $S'=0$, o modelo LOH II registrou valores extremos máximos mais elevados enquanto os menores foram observados no modelo LAHE II.

Para as posições a jusante da calha, inseridas na porção aerada do escoamento, o modelo LAHE II tende a apresentar valores extremos máximos mais elevados que aqueles observados no modelo LOH II.

Para os patamares não se identifica diferenças significativas entre o comportamento dos valores de CP99,9%. Nos espelhos é possível identificar que, de modo geral, o modelo LAHE II apresenta valores extremos superiores àqueles verificados nos demais modelos. Contudo, deve-se atentar para o fato do modelo LOH II indicar valores que fogem do padrão característico identificado para as posições $S'=-1,5$ e $S'=7,7$, fato que sugere dizer que erros

de medição possam ter influenciado a análise e, por isso, não possibilitam identificar efeitos de escala.

5.2.2.3.3 Vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Neste tópico as comparações entre os valores do coeficiente adimensional (CP) em função do adimensional de posição (S'), com vazão equivalente a $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ serão apresentadas. Destaca-se que as comparações serão realizadas apenas entre os modelos LAHE II e LOH II, pois, como já mencionado anteriormente, a limitação física do modelo LAHE impediu o ensaio de vazões específicas elevadas.

Nas figuras a seguir o comportamento adimensionalizado dos dados de carga de pressão média, flutuantes, extremas mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1% e de pressões extremas máximas, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, coletadas nos patamares e nos espelhos dos degraus será apresentado.

A Figura 51 traz a comparação entre os modelos para as distribuições dos dados de carga de pressão média na forma CP e avaliadas longitudinalmente por S' .

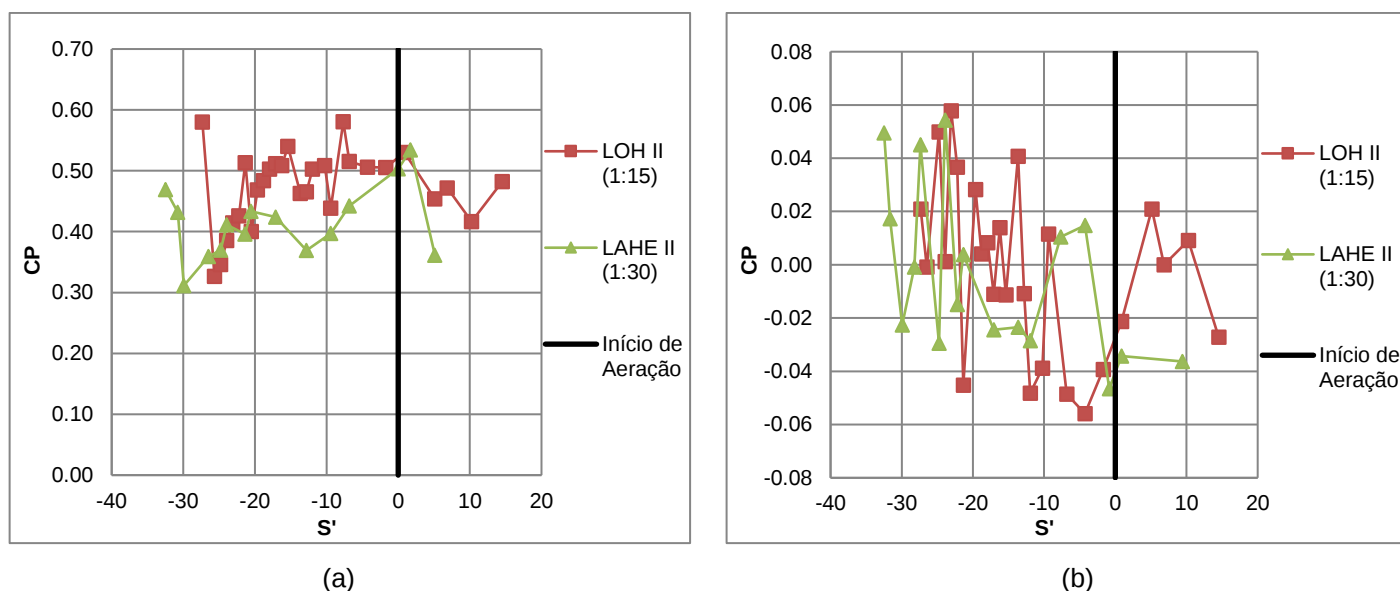


Figura 51 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Destaca-se que no eixo das abscissas existe uma alta concentração de valores negativos para o adimensional S' , em quantidade de elementos. Em

adição, é possível identificar que existe uma forte relação entre o valor do adimensional de posição longitudinal com as elevadas vazões, já que quanto maiores as vazões, a tendência é de que o ponto de início de aeração se desloque para os degraus mais de jusante.

Na região não aerada do patamar, identificada na Figura 51 (a), nota-se que o modelo LOH II predominantemente apresenta valores de CP mais elevados do que aqueles verificados no modelo LAHE II. A maior diferença entre os valores de CP registrados nos modelos LAHE II e LOH II é de 0,24 verificada em $S'=-27$.

No ponto de início de aeração a divergência entre os valores de CP registrados nos modelos diminui para 0,02.

Na porção aerada do escoamento percebe-se que o comportamento mantém-se o mesmo, com o modelo LOH II assumindo valores de CP maiores.

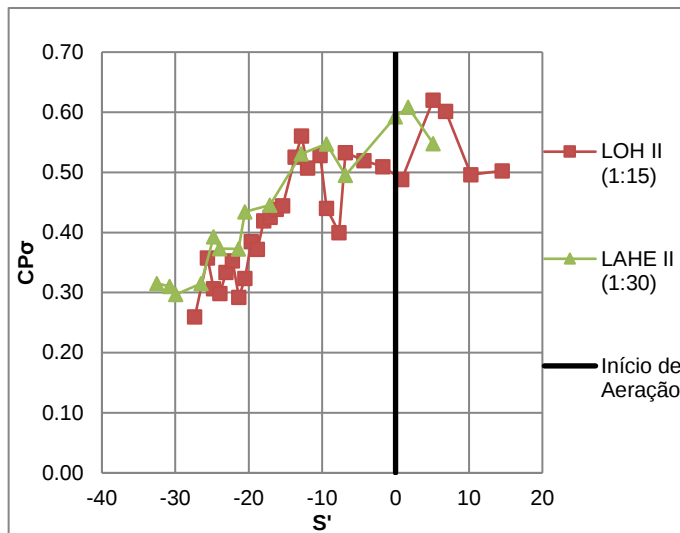
Nos espelhos o comportamento dos valores de CP é bastante oscilatório entre os modelos LAHE II e LOH II. Para as posições a montante do ponto de início de aeração é possível identificar que o modelo LAHE II tem tendência a apresentar valores de CP inferiores aqueles verificados nos espelhos. Contudo, entre as posições de $S'=-4$ e de $S'=-8$ verifica-se que o modelo LAHE II passa a registrar valores de CP superiores aos do modelo LOH II. A maior diferença entre os modelos, de 0,07 é verificada em $S'=-5$.

No ponto de início de aeração a diferença entre os valores de CP verificados nos modelos é de 0,01.

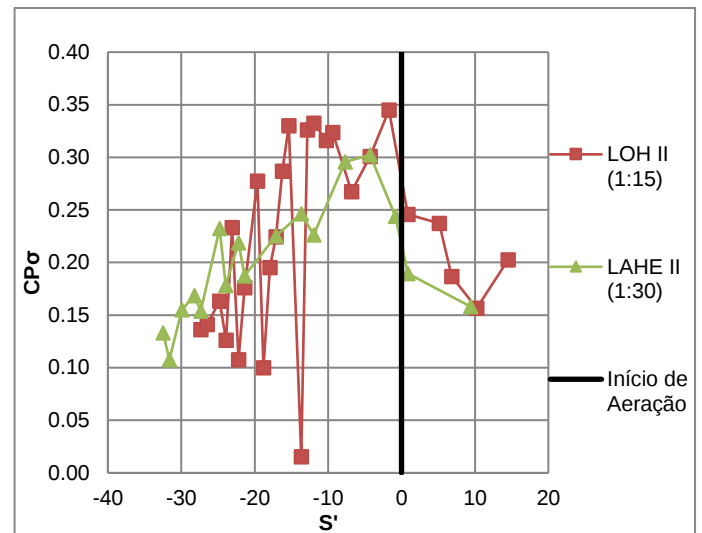
Para a posição jusante ao ponto de início de aeração nota-se que o modelo LOH II superestima os valores de CP, em relação aos observados no modelo LAHE II.

Assim verifica-se que nos patamares o modelo LAHE II tem tendência a apresentar valores subestimados de CP. Nos espelhos, apesar da dificuldade em caracterizar qualitativamente o comportamento dos valores de CP ao longo de S' , identifica-se que ambos os modelos tem comportamento semelhante, indicando a inexistência de efeitos de escala significativos.

Na Figura 52 a comparação entre os modelos para as distribuições dos valores de CP_{σ} por S' , com vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ é apresentada.



(a)



(b)

Figura 52 - Comparação do comportamento das flutuações de carga de pressão adimensionalizadas por $CP\sigma$ e S' , para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Na região não aerada do escoamento verifica-se, através da Figura 52 (a), que nos patamares o comportamento dos modelos LOH II e LAHE II são muito semelhantes. O modelo LAHE II apresenta valores de $CP\sigma$ levemente superiores aqueles verificados no modelo LOH II, com diferenças máximas inferiores a 0,10.

No ponto de início de aeração, apesar dos valores registrados pelos modelos terem maior magnitude a diferença se mantém a mesma, de 0,10.

Para a porção do escoamento sob o efeito de aeração natural, nota-se que novamente o modelo LAHE II registra valores adimensionais de cargas de pressão flutuantes mais elevados do que os observados no modelo LOH II, com exceção da posição $S'=-5$ em que no modelo LOH II o maior valor de $CP\sigma$ é identificado.

Para os espelhos, observa-se que na região não aerada do escoamento, com valores de S' menores ou iguais a -20, o modelo LAHE II indica valores do coeficiente de pressão flutuante mais elevado. A partir deste ponto observa-se comportamento contrário, com o modelo LOH II superestimando os valores de $CP\sigma$. Identifica-se que as diferenças observadas entre os modelos são pequenas, normalmente inferiores a 0,1. Cabe destacar que para a posição de $S'=-14$ observa-se diferenças da ordem de 0,22 entre os modelos; como já apontado anteriormente, no modelo LOH II possivelmente um erro no

transdutor de coleta do dado de pressão pode estar influenciando esta divergência.

A Figura 53 apresenta o comportamento das distribuições das cargas de pressão extremas mínimas ($CP_{0,1\%}$) em função do adimensional de posição S' para a condição de vazão equivalente $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

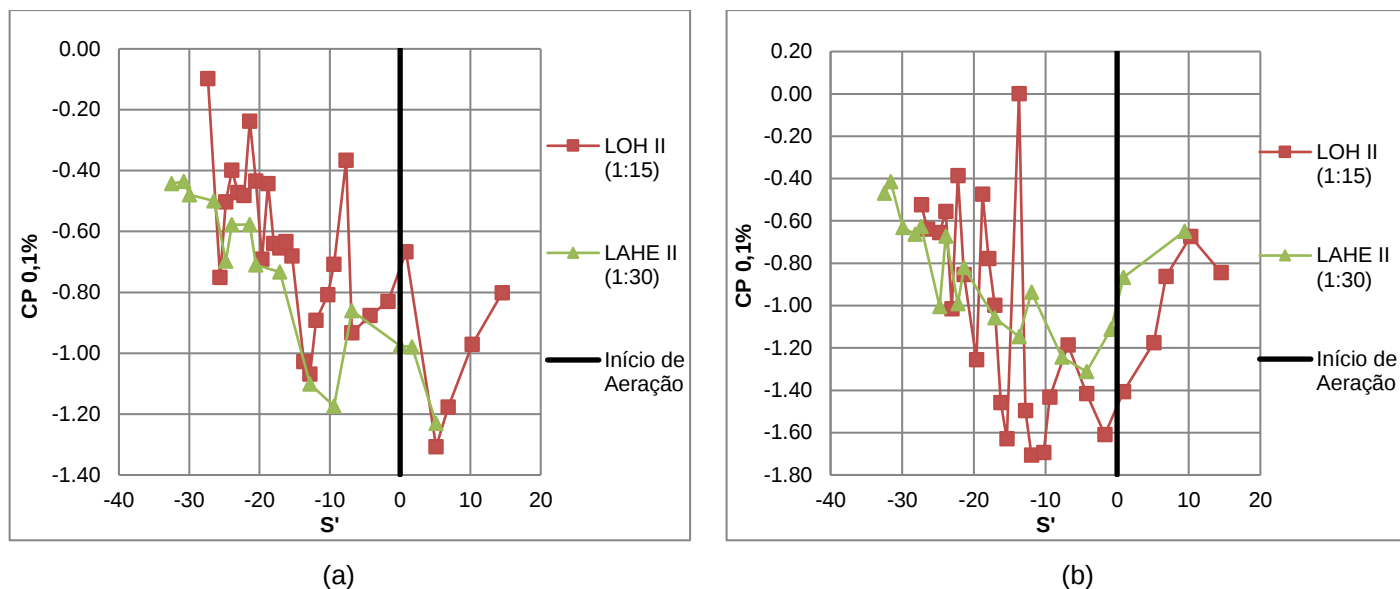


Figura 53 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema mínimas, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Para a região não aerada do escoamento, identifica-se nos patamares que o comportamento dos valores de $CP_{0,1\%}$ distribuídos em função de S' nos modelos é semelhante. Observa-se que o modelo LAHE II apresenta valores de $CP_{0,1\%}$ levemente inferiores ao observados em LOH II, com diferença máxima de 0,5 entre os valores registrados em $S'=-8$.

No ponto de início de aeração as diferenças observadas entre os modelos diminuem a valores de 0,3. Na região aerada do escoamento as diferenças passam a ser ainda menores, de apenas 0,08 em $S'=5$.

Nos espelhos, para a região não aerada do escoamento, visualiza-se com base na Figura 53 (b) que existe uma grande oscilação entre os valores registrados de $CP_{0,1\%}$ ao longo do comprimento da calha. Nota-se que até o ponto em que S' é igual ou menor a -14 o modelo LAHE II tem a predisposição a indicar valores menores que os verificados no modelo LOH II. A partir desta posição, os valores de $CP_{0,1\%}$ registrados em LOH II passam a ser inferiores.

Cabe observar que o valor de $CP_{0,1\%}$ registrado no modelo LOH II em $S'=-14$ difere significativamente do comportamento das distribuições apresentadas ao longo da calha. Assim, nesta posição é observada a maior divergência entre os valores de $CP_{0,1\%}$ observados entre os modelos, de 1,14.

Na posição de início de aeração a maior diferença entre os valores do coeficiente de pressão extremos mínimos é de 0,53. Para as posições a jusante do ponto de início de aeração os valores de $CP_{0,1\%}$ registrados nos dois modelos é praticamente igual, para $S'=9$.

A Figura 54 apresenta os valores de $CP_{99,9\%}$ registrados nos modelos físicos, para vazão equivalente de $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

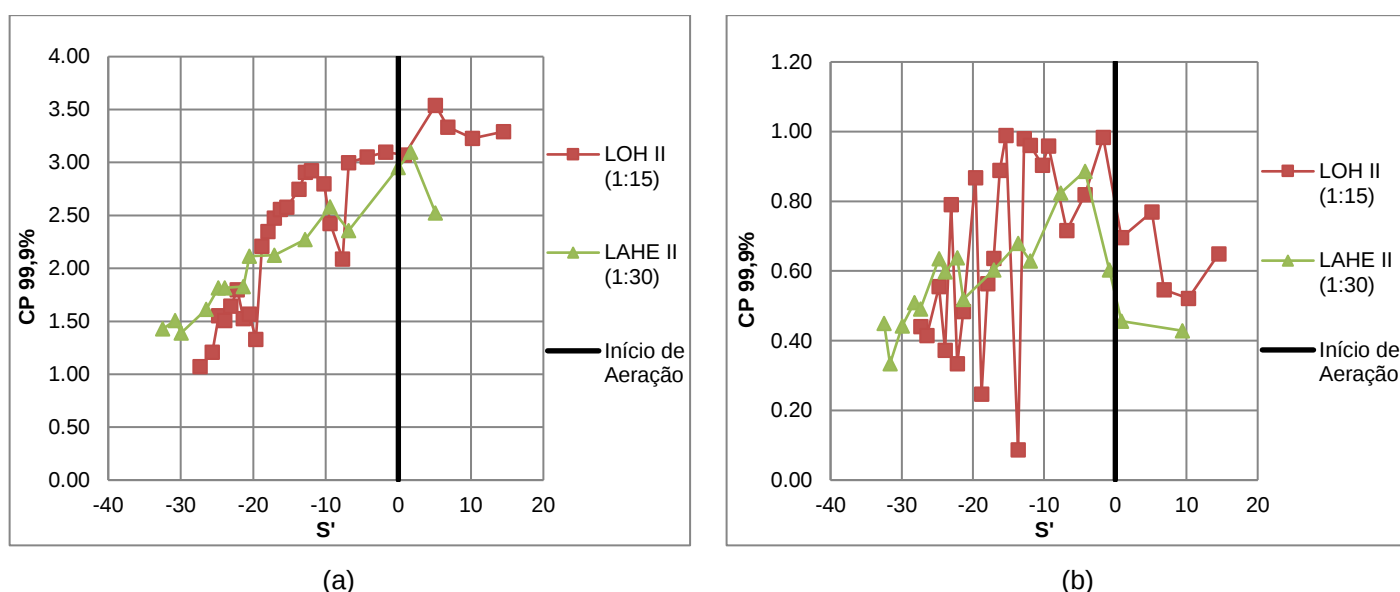


Figura 54 - Comparação do comportamento das cargas de pressão extrema máximas, com probabilidade de não-excedência de 99,9%, adimensionalizadas por CP e S' , para os modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Ao analisar especificamente a região não aerada do escoamento, com especial ênfase nas posições mais a montante da calha (para valores de S' menores que -20), é possível observar que o modelo LAHE II apresenta valores extremos máximos maiores que os verificados no modelo LOH II. A partir deste ponto até a posição do afloramento da camada limite identifica-se que o modelo LOH II passa a registrar valores de $CP_{99,9\%}$ mais elevados. A maior diferença verificada entre os valores de $CP_{99,9\%}$ é de 0,65 para $S'=-12$

Na posição onde ocorre a incorporação de ar no escoamento os valores registrados entre os modelos são praticamente idênticos. Para as posições a

jusante do ponto de início de aeração, observa-se diferenças de 1,0 nos valores de CP99,9% registrados entre os modelos LOH II e LAHE II em S'=5.

Nos espelhos, para a região a montante do ponto de início de aeração do escoamento o modelo LAHE II apresenta, predominantemente, para os mesmos pontos de S' instrumentados, valores superiores aos registrados pelo modelo LOH II.

Na posição de início de aeração o modelo LOH II passa a registrar valor superior ao verificado pelo modelo LAHE II, com diferença de 0,24. A jusante, na região aerada do escoamento, o modelo LOH II continua a apresentar valores superiores de CP99,9%; as diferenças entre os modelos reduz para 0,10 em S'=10.

De modo geral, verifica-se que o modelo LAHE II tende a apresentar valores de CP99,% inferiores aos do modelo LOH II para os patamares e espelhos. Entretanto, nos espelhos, para a região não aerada do escoamento, o modelo LOH II subestima os valores extremos máximos de CP99,9%.

5.2.3 Adimensional ζ x S'

Visando explorar os adimensionais adotados pela literatura quanto as cargas de pressão, este estudo avaliou complementarmente o adimensional ζ , sendo este, como descrito na metodologia, resultado de razão entre as cargas de pressão (podendo assumir valores médios, flutuantes ou extremos) com a altura crítica do escoamento, identificada para cada vazão.

$$\zeta_{p_x} = \frac{\frac{P_x}{\gamma}}{h_c} \quad \text{Equação (32)}$$

O comportamento longitudinal adimensionalizado por ζ e por S' no eixo X, com as vazões ensaiadas em cada modelo, apresentadas de modo discretizado, para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II pode ser verificado nos Apêndices H, I e J.

De modo análogo ao processo demonstrado no item 5.2.2.1, usando como exemplo o comportamento adimensionalizado por ζ nas cargas de pressão média para o modelo LAHE II (Figura 55), identifica-se que a faixa de valores assumidos por ζ tem uma amplitude maior que aquelas verificadas no

adimensional CP, quando avaliadas as mesmas posições de S' , aplicando-se tanto para patamares quanto para os espelhos.

Além disso, no patamar, o emprego do adimensional ζ provoca efeito inverso aquele observado com o emprego de CP. Verifica-se que para as menores vazões ensaiadas, os valores apresentados por ζ são superiores aos registrados pelas maiores vazões, para os mesmos pontos de S' . Situação oposta à observada na Figura 39 (a).

Para os espelhos o padrão observado segue as mesmas constatações quando empregado o adimensional CP.

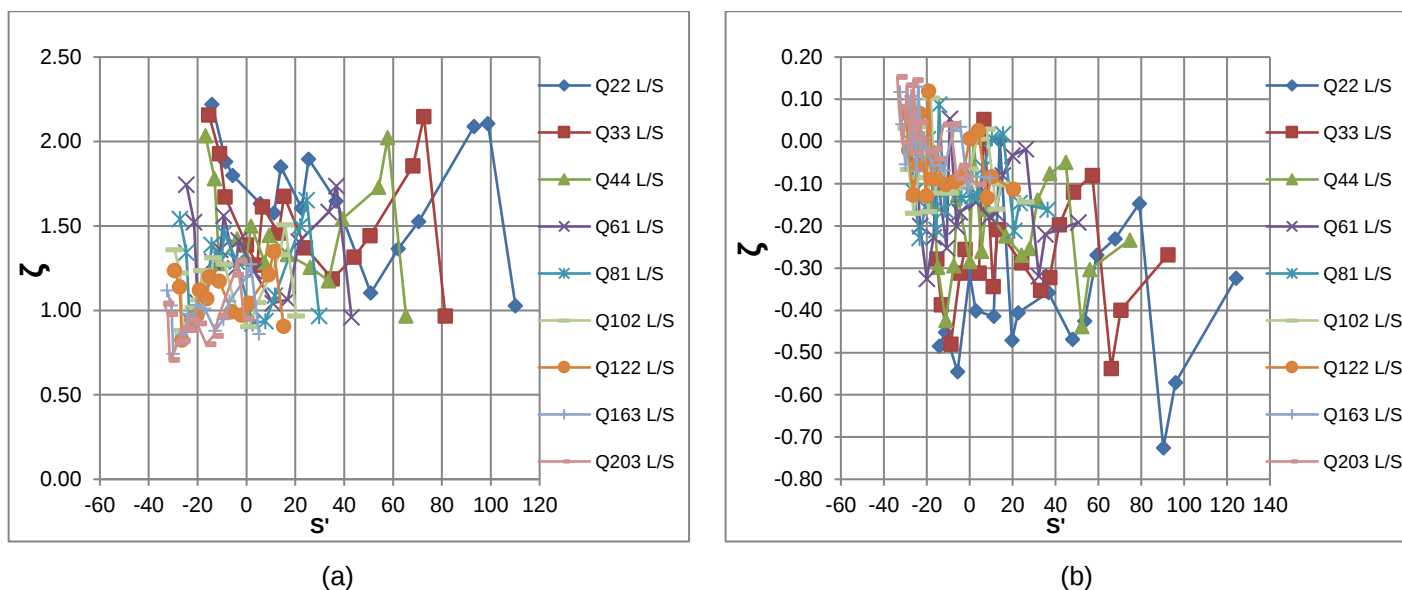
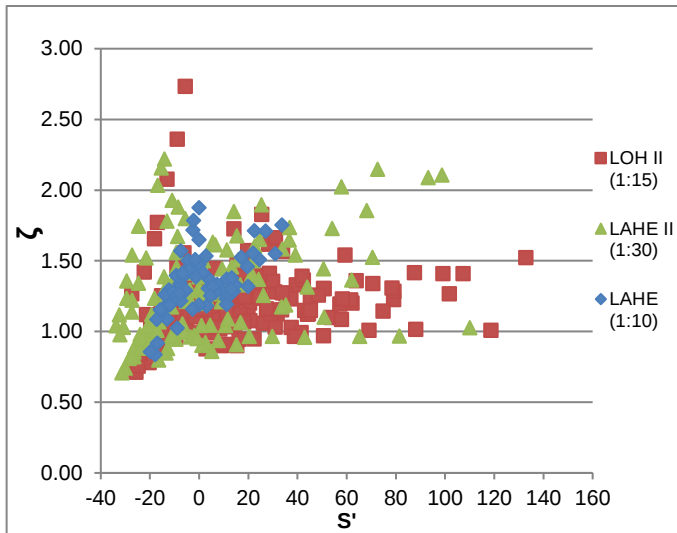
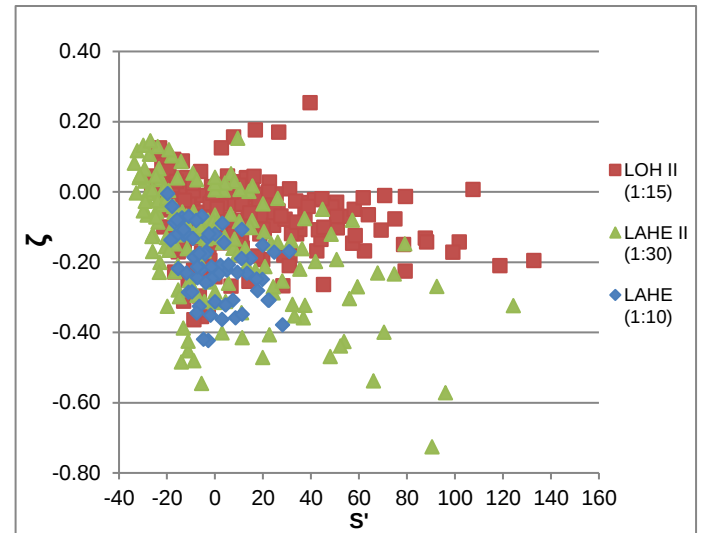


Figura 55 - Comportamento das cargas de pressão média no modelo LAHE II, adimensionalizados na forma de ζ e S' no (a) Patamar e (b) Espelho.

Adicionalmente, foram avaliados os comportamentos das cargas de pressão média adimensionalizadas na forma de ζ e S' , para os três modelos simultaneamente, como mostra a Figura 56.



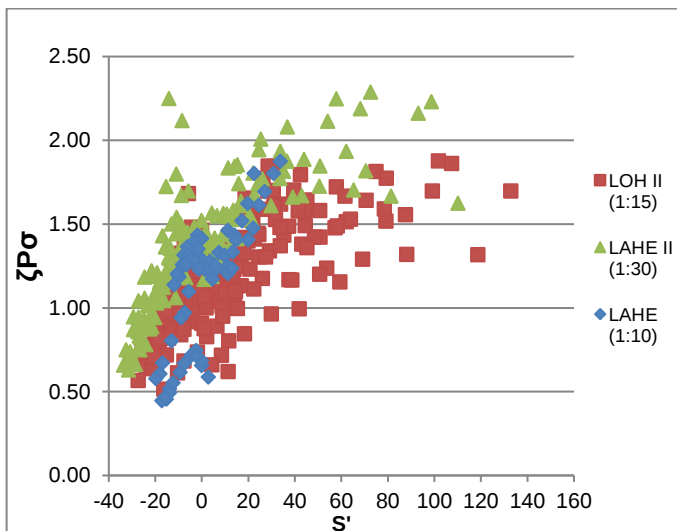
(a)



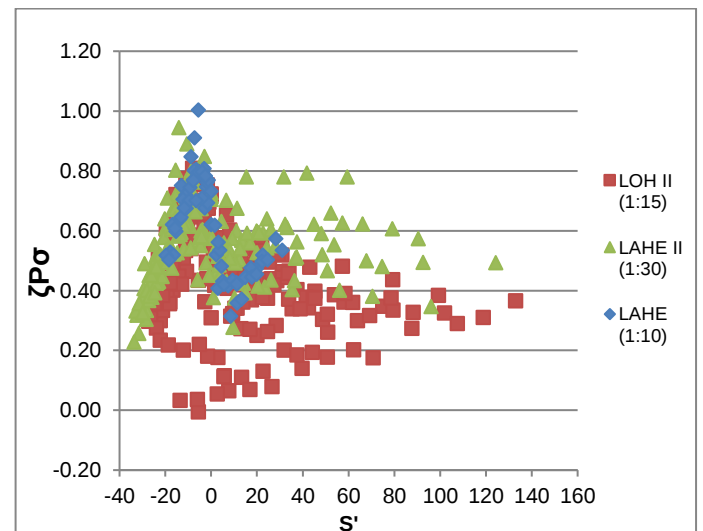
(b)

Figura 56 - Comportamento das cargas de pressão média, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas na forma de ζ e S' no (a) Patamar e (b) Espelho

Ao analisar a Figura 56, identifica-se diferenças significativas entre os modelos físicos, principalmente nos espelhos dos degraus. No entanto, ao se analisar as flutuações e as pressões extremas estas divergências ficam ainda mais evidentes e percebe-se o quanto a adoção de ζ traz valores destoantes entre os modelos. A Figura 57 ilustra este fato a partir dos dados adimensionalizados de carga de pressão flutuantes, para patamar e espelho. As demais comparações, envolvendo as outras informações de carga de pressão podem ser consultadas no Apêndice K.



(a)



(b)

Figura 57 - Comportamento das flutuações de carga de pressão, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas na forma de ζ e S' no (a) Patamar e (b) Espelho

Constata-se que, após observar a distribuição das flutuações de pressão adimensionalizadas na forma de ζ (exposta na Figura 57), existe uma grande diferença principalmente entre o comportamento verificado do modelo LAHE em relação aos demais modelos. Além disso, os dados do modelo LAHE II demonstram vocação a registrar valores de ζ majoritariamente superiores aos demais modelos, enquanto o modelo LOH II tende a subestimar as oscilações de pressão.

Desta forma, a análise adimensional empregada no eixo das ordenadas, para os valores de carga de pressão, adotará, nas demais verificações o coeficiente de pressão (CP) como padrão de análise.

5.2.4 Adimensional CP x L/L_a

A alternativa de adotar o adimensional L/L_a em substituição ao adimensional de posição longitudinal é baseada nas incertezas que o termo h_a implica na estimativa de S' . Como apresentado na metodologia, a determinação experimental da profundidade do escoamento no ponto de início de aeração é bastante incerta, pois se verificam fortes perturbações na superfície livre, ocasionando grandes oscilações de nível. A alternativa adotada por alguns autores, como Gomes (2006), foi empregar um modelo teórico para sua estimativa.

Neste estudo, dadas as condições de definição das características dos modelos utilizados, a determinação de h_a foi realizada através do emprego da equação 9 proposta por Sanagiotto (2003), verificadas as suas limitações de aplicação recomendadas.

De modo a exemplificar o fenômeno que se observa quanto o comportamento das cargas de pressão adimensionalizadas por CP em função de L/L_a , para as vazões equivalentes, a Figura 58 elucida o caso específico do coeficiente de pressão médio.

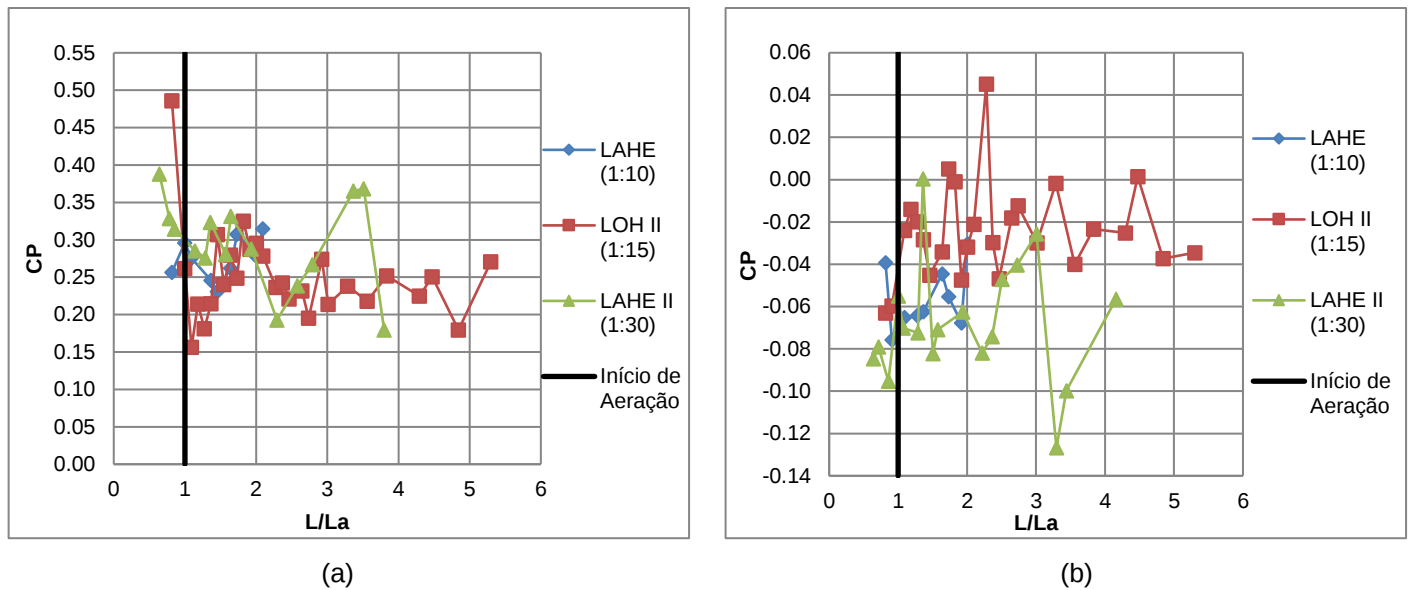


Figura 58 - Comparação do comportamento das cargas de pressão média adimensionalizadas por C_p e L/L_a , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho

Ao se comparar a Figura 58 com a 43, verifica-se que os valores assumidos pelo adimensional L/L_a tem uma menor amplitude. Além disso, cabe frisar que o ponto onde o valor de L/L_a é igual a 1 indica a posição de início de aeração; sendo os valores maiores correspondentes as posições mais a jusante da calha (zona aerada do escoamento), em relação ao ponto de início de aeração, e os menores mais de montante (zona não aerada do escoamento). Por isso, julga-se que a interpretação dos dados de carga de pressão, quando adimensionalizadas horizontalmente por L/L_a apresenta uma maior facilidade, por ser mais intuitiva que aquela verificada em S' .

Frente ao exposto, constata-se que apesar da interpretação de L/L_a ser mais vantajosa, as conclusões sobre as cargas de pressão são idênticas às aquelas apresentadas no item 5.2.2.3.1. visto que os valores C_p de não sofreram alteração.

O comportamento das cargas de pressão média, flutuantes e extremas adimensionalizadas por C_p em função de L/L_a , para as vazões equivalentes de $q=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e de $q=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ são apresentadas nos Apêndices L, M e N, respectivamente.

5.3 Análise dos Erros relacionados aos transdutores de pressão

Heller (2011) enfatizou que os efeitos de escala incluem o uso de técnicas não idênticas no processo de amostragem de dados, denominados pelo autor como efeitos de medição. Assim, as figuras a seguir apresentam a interferência que os erros dos diversos transdutores utilizados, para cada configuração de ensaio, podem causar no valor de carga de pressão medido e, por conseguinte no valor do coeficiente de pressão.

Como pôde ser verificado nas tabelas 8 a 13, diferentes marcas e modelos de transdutores foram utilizados nos degraus dos três modelos. Em função das faixas máximas e mínimas aplicáveis e da exatidão de cada equipamento, diferentes erros são observados ao longo da calha para um mesmo modelo.

Desta maneira, a título de exemplo, os coeficientes de pressão médios, calculados a partir da equação 34, ilustrarão o impacto destes erros.

5.3.1 Modelo LAHE

No patamar do modelo LAHE todos os transdutores utilizados ao longo da calha foram do mesmo modelo, com a mesma exatidão. No entanto, a partir do oitavo degrau a faixa de operação dos transdutores utilizados, que nos degraus a montante era de -1 a 2 m.c.a. (ver tabela 8) passou para a faixa de -1 a 3 m.c.a.

Nos degraus mais próximos à crista, os transdutores usados podem reproduzir uma alteração de até 0,03 m.c.a. nos valores de carga de pressão medidos, em escala de protótipo. Quando avaliados adimensionalmente estas diferenças podem chegar até 0,005, para mais ou para menos, nos valores dos coeficientes de pressão.

Para os patamares dos degraus, instrumentados com os transdutores de pressão com faixa de operação mais ampla, o erro atrelado pode chegar a marca de 0,04 m.c.a., em escala de protótipo. No adimensional CP a diferença pode ser de até 0,007 para mais ou para menos.

Na Figura 59 o comportamento adimensionalizado, no patamar, descrito para a vazão de 115L/s (valor de modelo) é apresentado. Na sequência, a tabela 14 mostra também as variações de CP em função do erro dos

transdutores para a vazão de 316L/s (também valor de modelo). As vazões de 115L/s e de 316L/s foram aqui apresentadas pois são as correspondentes as vazões equivalentes aos modelos LOH II e LAHE II em $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

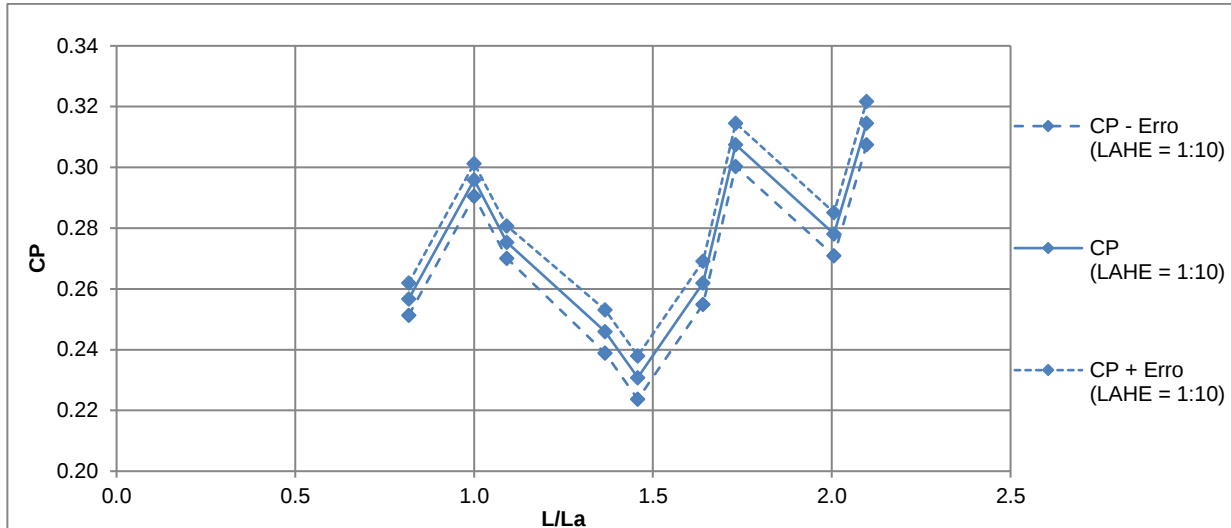


Figura 59 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus do modelo LAHE, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 115L/s.

Tabela 14 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos patamares do modelo LAHE, para as vazões de 115L/s e de 316L/s.

MODELO/SÉRIE	Erro Protótipo (m.c.a.)	ΔCP 115L/s	ΔCP 316L/s
Zurich PSI 420	0.030	0.005	0.004
Zurich PSI 420	0.040	0.007	0.006

Para os espelhos, como se identifica na Figura 60, as oscilações dos valores de CP mantiveram-se constantes, na ordem de 0,005. Cabe destacar que, como apresentado na tabela 9, o mesmo modelo de transdutor, com as mesmas características técnicas, foi empregado ao longo da calha para a aquisição dos dados de carga de pressão.

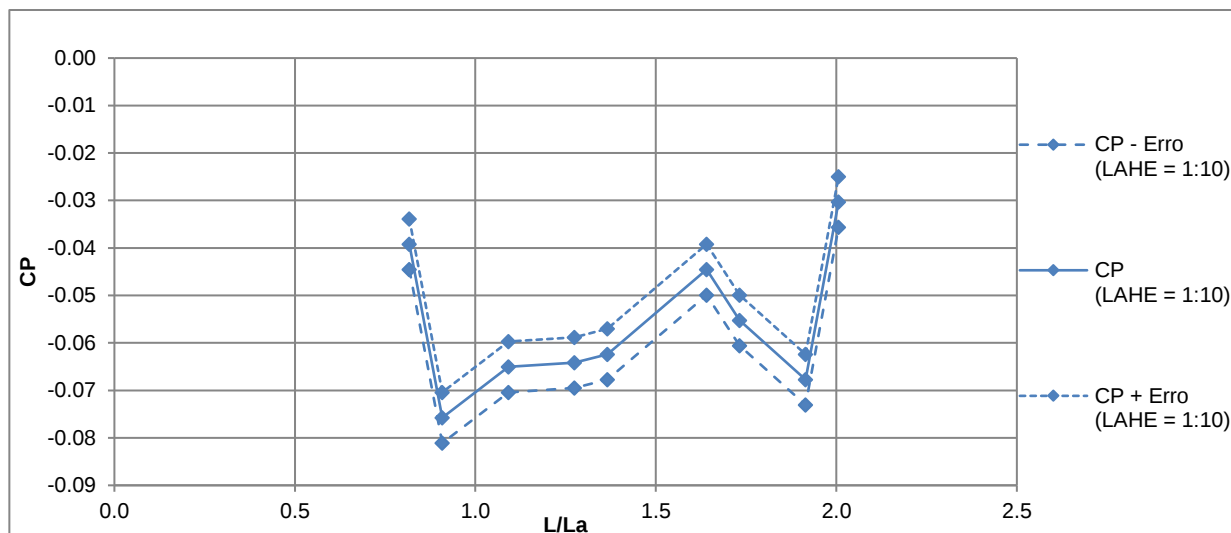


Figura 60 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus do modelo LAHE, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 115L/s.

De modo análogo, para a vazão de 316L/s a variação de CP se manteve a mesma, de 0,005, como apresenta a tabela 15.

Tabela 15 - Variação do coeficiente de pressão médio em função do transdutor instalado nos espelhos do modelo LAHE, para as vazões de 115L/s e de 316L/s.

MODELO/SÉRIE	Erro Protótipo (m.c.a.)	ΔCP 115L/s	ΔCP 316L/s
Zurich PSI 420	0.030	0.005	0.005

5.3.2 Modelo LOH II

Análise idêntica foi realizada para o modelo LOH II, onde se nota que no patamar os valores de carga de pressão média adimensionalizados poderiam destoar daqueles registrados, de acordo com o apresentado na Figura 61.

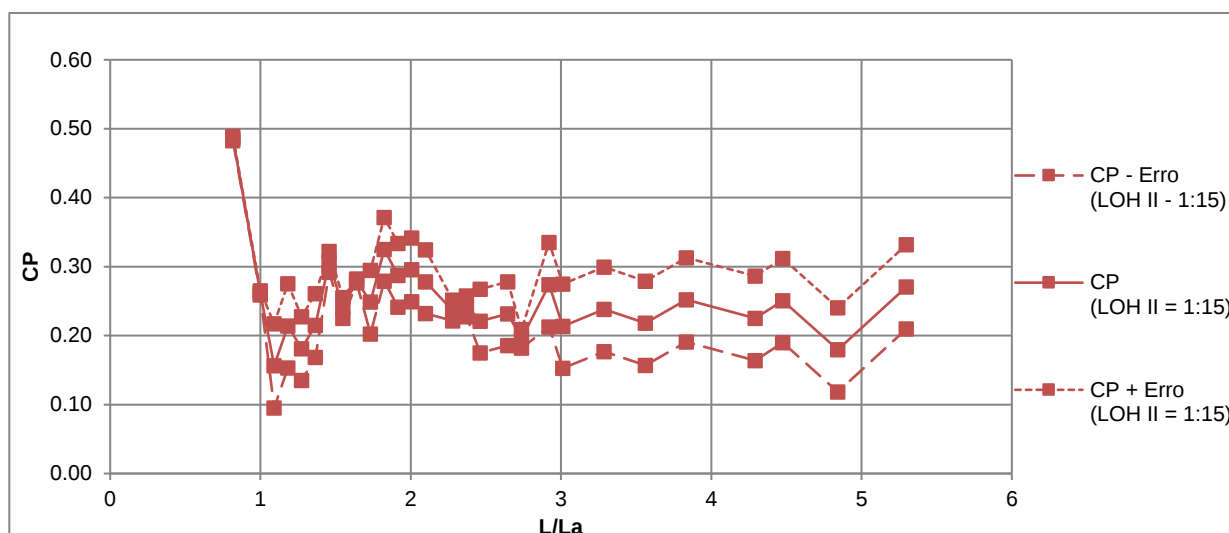


Figura 61 – Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus do modelo LOH II, em função do adimensional L/La para a vazão de 27 L/s.

Fica evidente que os valores medidos na porção mais a montante da calha têm um menor erro associado do que aqueles verificados mais a jusante; e por consequência, os valores de CP tem menor amplitude de variação na faixa de L/La de até 3.

Observa-se que nos dois primeiros pontos a variação de CP é praticamente nula, pois o erro do transdutor utilizado é muito pequeno. Nos pontos seguintes, já na região aerada, o valor do erro dos equipamentos dobra, atingindo o maior erro observado nos transdutores instalados ao longo da calha, para os patamares. Isso faz com que a variação entre os valores máximos e mínimos do adimensional CP possam variar em até 0,06 para mais ou para menos.

Na faixa em que a relação L/La assume valores entre 1 e 3 se verifica que existe uma variação desigual entre os valores de CP. Isto é reflexo dos diferentes modelos de equipamento utilizados nos degraus correspondentes. A partir deste ponto, que coincide ao degrau de número 26, o mesmo modelo de transdutor foi empregado, e assim a variação entre os valores de CP se mantiveram constantes.

Na tabela 16 são apresentadas de forma detalhada as variações observadas em CP, para os transdutores instalados no patamar do modelo LOH II, correspondentes as vazões equivalentes de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ e $q_p=22,3\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Tabela 16 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos patamares do modelo LOH II, para as vazões de 27L/s 75L/s e de 200L/s.

MODELO/SÉRIE	Erro Protótipo (m.c.a.)	ΔCP 27L/s	ΔCP 75L/s	ΔCP 200L/s
ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0.017	0.003	0.0026	0.002
SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0.344	0.061	0.052	0.041
SITRON - SP96 (SÉRIE: S100)	0.260	0.046	0.039	0.031
ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0.084	0.015	0.013	0.01
HYTRONIC - TM25/250M/R/44/D/2B (SÉRIE: H0)	0.075	0.013	0.011	0.009

Cabe ressaltar que, como verificado na tabela 16, os valores das variações de CP são dependentes dos erros dos transdutores, assim como mudam em função das vazões ensaiadas. No entanto, para a mesma vazão, os valores de ΔCP não se alteram em função do tipo de dado adimensionalizado (carga de pressão média, flutuantes ou extremas).

Nos espelhos, como mostra a Figura 62, a região de jusante apresentou as discrepâncias mais acentuadas em relação ao valor de CP, na maior porção da calha.

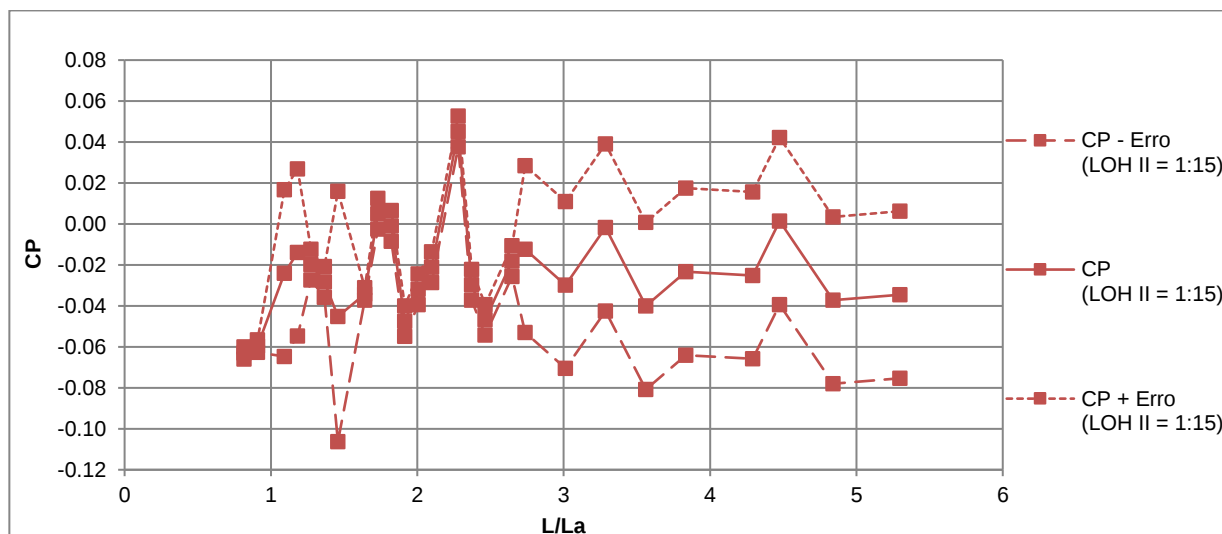


Figura 62 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus do modelo LOH II, em função do adimensional L/La para a vazão de 27L/s.

Até a distância horizontal de L/La igual a 3, as diferenças entre os valores de CP oscilaram de 0,003 à 0,06 e são atreladas aos erros de transdutor, em escala de protótipo de 0,017m.c.a e de 0,344m.c.a, respectivamente. Após este ponto, as diferenças se mantêm constantes, visto

que o mesmo modelo de transdutor é utilizado nos degraus sucessivos, com valor de 0,04.

De modo complementar, a tabela 17 apresenta as variações nos valores de CP para os transdutores alocados nos espelhos do modelo LOH II, para as vazões ensaiadas de 27L/s, 75L/s e de 200L/s.

Tabela 17 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos espelhos do modelo LOH II, para as vazões de 27L/s 75L/s e de 200L/s.

MODELO/SÉRIE	Erro Protótipo (m.c.a.)	ΔCP 27L/s	ΔCP 75L/s	ΔCP 200L/s
ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0.017	0.003	0.0025	0.002
SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0.229	0.041	0.035	0.028
ÔMEGA - PX419 (SÉRIE: OM00)	0.042	0.007	0.0064	0.005
SITRON - SP96 (SÉRIE: SN0)	0.344	0.061	0.052	0.041

5.3.3 Modelo LAHE II

No patamar do modelo LAHE II foram usados transdutores de pressão de duas marcas, conforme apresenta a tabela 12. Contudo, deve-se atentar que para o modelo Zurich PSI 420 existem dois equipamentos com faixas distintas de operação e que por consequência, como descrito no item 5.3.1, causam alteração nos valores de erro do equipamento.

Assim, nos patamares instrumentados com o modelo Zurich PSI 420 com limites de aplicação variando de -1 a 2 m.c.a, cujo erro em escala de protótipo corresponde à 0,09 m.c.a., as diferenças verificadas no adimensional CP podem atingir a marca de até 0,016. Ao passo que, para as cargas de pressão medidas com o mesmo modelo, mas com faixa de aplicação de -1 a 3 m.c.a., com erros correspondentes a 0,12 m.c.a., as diferenças de CP podem chegar ao valor de 0,021. Para o modelo Hytronic TM01 as variações observadas no adimensional de pressão CP podem alcançar o valor de 0,013.

De modo a ilustrar as observações descritas acima, a Figura 63 é apresentada.

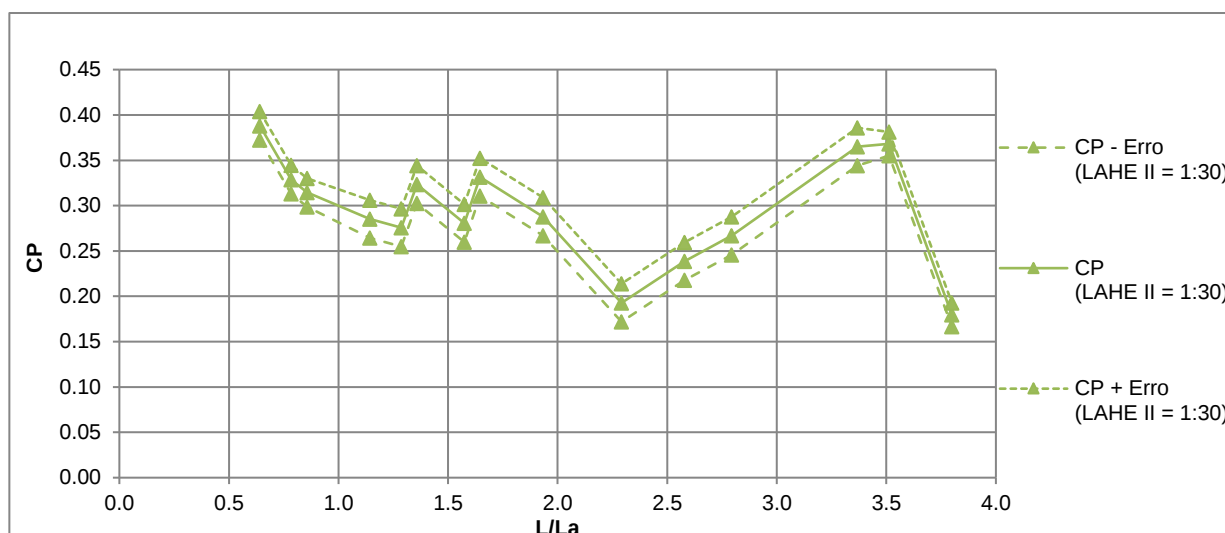


Figura 63 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus do modelo LAHE II, em função do adimensional L/La para a vazão de 22L/s.

Na tabela 18 são apresentadas as variações de CP em função dos erros dos transdutores empregados, e que se estendem as demais informações de dados do campo de pressão, verificadas no patamar do modelo LAHE II, para as vazões de 22,0L/s, 61,0L/s e de 162,5L/s, correspondentes as vazões equivalentes entre os modelos físicos utilizados neste estudo.

Tabela 18 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos patamares do modelo LAHE II, para as vazões de 22L/s 61L/s e de 162.5L/s.

MODELO/SÉRIE	Erro Protótipo (m.c.a.)	ΔCP 22L/s	ΔCP 61L/s	ΔCP 162,5L/s
Zurich PSI 420	0.090	0.016	0.013	0.010
Zurich PSI 420	0.120	0.021	0.017	0.013
Hytronic TM01	0.075	0.013	0.011	0.008

No espelho do modelo LAHE II dois equipamentos foram usados. O transdutor ZURICH PSI 420, devido suas características e limitações apontadas pelo fabricante pode provocar um erro de até 0.09 m.c.a nos dados coletados. Na análise adimensional este erro pode implicar em diferenças de até 0.016, verificadas até a posição L/La de 1.6.

Para valores de L/La superiores, dos quais correspondem aos degraus mais de jusante da calha, os espelhos foram instrumentados por pelos transdutores da marca Hytronic TM01, cujo erro em escala de protótipo

equivale a 0,075 m.c.a e que nos valores de CP podem implicar em variações de 0,013.

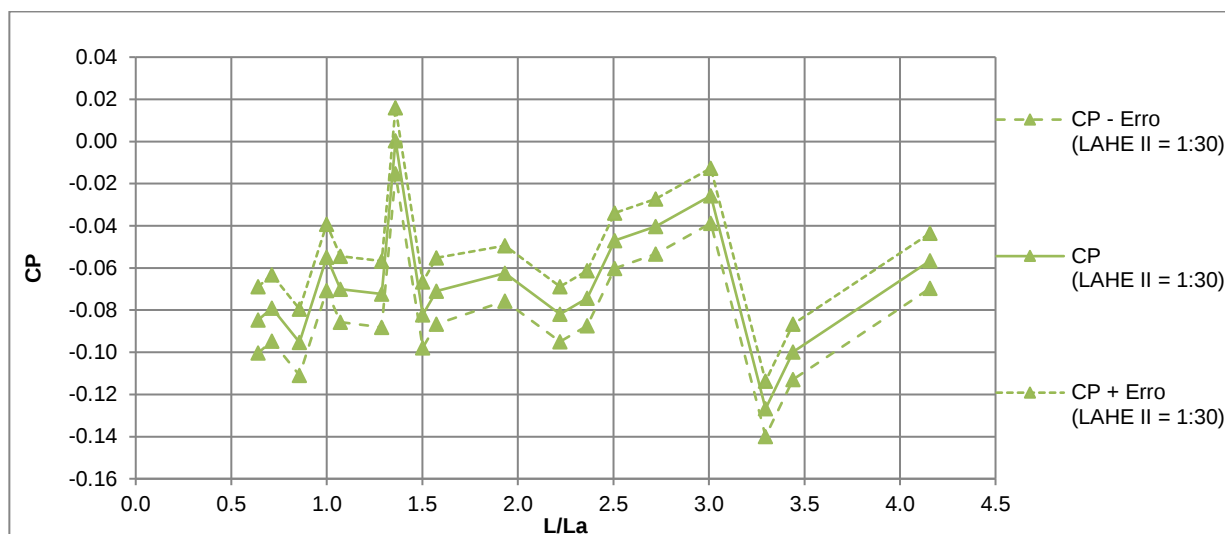


Figura 64 - Variação do coeficiente de pressão considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus do modelo LAHE II, em função do adimensional L/L_a para a vazão de 22L/s.

Adicionalmente, na tabela 19 verificam-se as variações de CP para os dados de carga de pressão, obtidas nos espelhos do modelo LAHE II para as vazões de 22L/s, além das vazões de 61L/s e de 162.5L/s.

Tabela 19 - Variação dos coeficientes de pressão médio em função dos transdutores instalados nos espelhos do modelo LAHE II, para as vazões de 22L/s 61L/s e de 162.5L/s.

MODELO/SÉRIE	Erro Protótipo (m.c.a.)	Δ CP 22L/s	Δ CP 61L/s	Δ CP 162.5L/s
Zurich PSI 420	0.090	0.016	0.013	0.010
Hytronic TM01	0.075	0.013	0.011	0.008

Na sequência, serão apresentados os valores de CP, avaliando vazões equivalentes, considerando os erros esperados pelos transdutores.

5.3.4 Vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Visando verificar a influência dos erros de medição no efeito de escala, as Figuras 65 e 66 têm por objetivo exemplificar o comportamento que se repete nos demais gráficos de comparação das variações do coeficiente de pressão, para a vazão equivalente igual a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Deve-se frisar que, como já reportado anteriormente, as variações dos coeficientes de pressão (médio, flutuantes ou extremos) não sofrem alteração

quando investigadas sob a mesma vazão, no mesmo modelo. Entretanto, ter uma análise que reúna os três modelos com as estimativas dos coeficientes CP (observados os possíveis erros) entre vazões equivalentes traz um panorama mais abrangente.

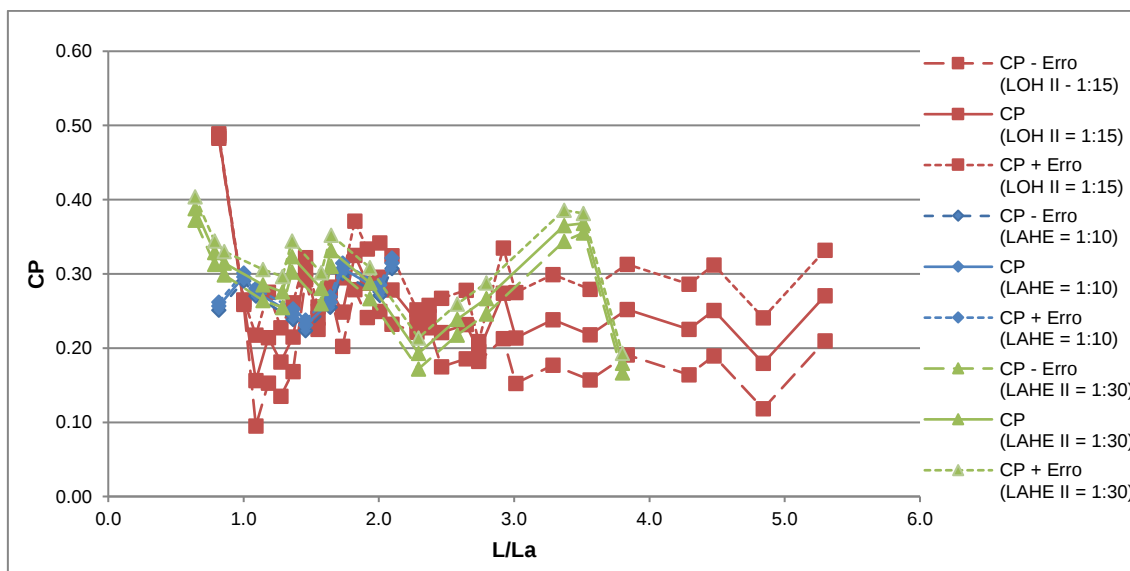


Figura 65 – Comparação da variação do coeficiente de pressão nos patamares, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s/m}$

Ao observar a Figura 65 nota-se que as variações do coeficiente de pressão registradas nos patamares do modelo LAHE são desprezíveis, ao compará-las com aquelas verificadas nos demais modelos. As variações observadas no modelo LAHE II, embora perceptíveis, são pequenas como verificado na tabela 18. O modelo LOH II, por sua vez, registra variações com dimensões mais elevadas, chegando a ordem de 0,061 para mais ou para menos daquelas registradas.

No ponto de L/L_a igual a 1,1 as variações entre os valores de CP podem destoar em até 0,12 daquelas variações observadas entre os modelos LAHE e LOH II (desconsiderando os erros). Se avaliássemos esta diferença entre os valores máximos do modelo LAHE (CP + erro) com os mínimos do modelo LOH II (CP – erro), ou seja, extrapolando para a condição mais crítica, esta diferença poderia ser de até 0,19. Já entre os modelos LOH II e LAHE II a diferença entre os valores de CP é de 0,13; para a condição mais extremista esta diferença poderia alcançar até 0,21.

No ponto onde L/L_a equivale a 3,8 a diferença entre os valores de variação de $CP_{méd}$ para o modelo LOH II e LAHE II é de 0,07. Para a extrapolação, se considerarmos o menor valor admissível no modelo LAHE II e o maior de LOH II, a diferença do valor de $CP_{méd}$ pode ser de até 0,15.

Esta constatação permite inferir que, embora o comportamento entre os modelos seja diferente em alguns pontos, se considerados os erros, estas podem ser atenuadas ou ainda mais intensificadas.

Nos espelhos, conforme mostra a Figura 66, novamente, a magnitude dos erros dos transdutores do modelo LOH II sobressai aos demais.

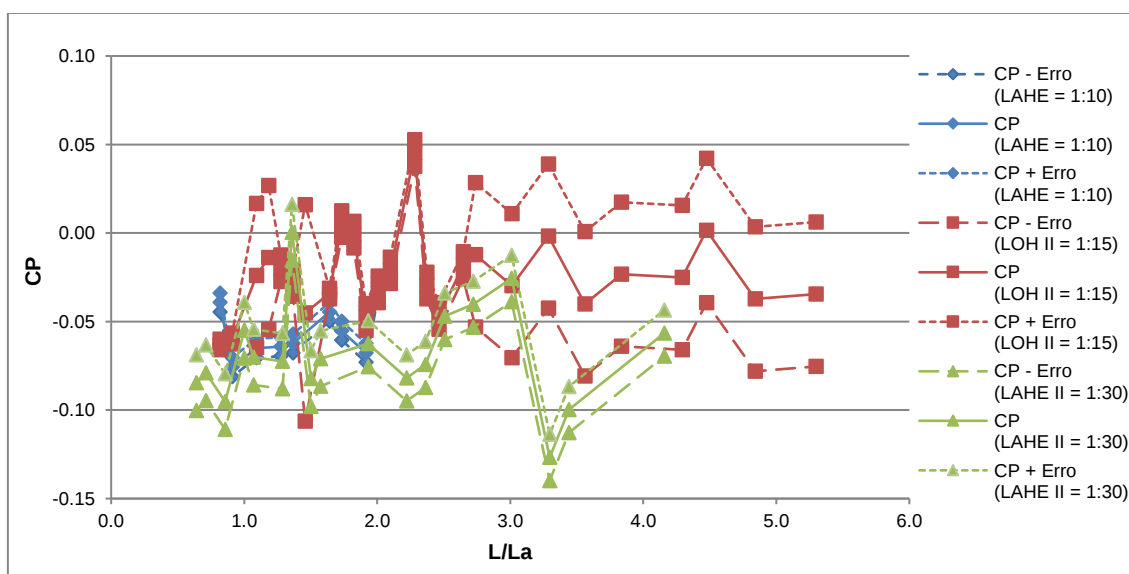


Figura 66 - Comparação da variação do coeficiente de pressão nos espelhos, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Avaliando o ponto $L/L_a=1,1$ as variações de CP entre o modelo LAHE e LOH II são da ordem de 0,04 assim como entre os modelos LAHE II e LOH II. Ao realizar as extrapolações verifica-se que as diferenças podem atingir a marca de 0,09 e de 0,10, respectivamente.

Em $L/L_a=3,3$ a diferença é de 0,13 entre as os coeficientes de pressão verificados nos modelos LAHE II e LOH II. Quando avaliados os valores mais extremos de cada modelo, a diferença pode chegar a 0,18.

Comparando a Figura 43 (a) com a Figura 65, nota-se que ao final da calha, para L/L_a superiores a 3, em função da grande faixa de valores possíveis de serem assumidos em CP , quando considerados os erros, a diferença verificada entre o comportamento dos modelos LOH II e LAHE II podem estar

associadas aos erros dos transdutores. A mesma avaliação se estende para os espelhos, quando confrontadas as Figuras 43 (b) e Figura 66.

Os gráficos do comportamento das variações de CP para as cargas de pressão média, flutuantes e extremas para a vazão equivalente de $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ são disponibilizadas no Apêndice O, para o patamar e no Apêndice P, para o espelho.

5.3.5 Vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Com o aumento das vazões nota-se que existe uma redução na amplitude dos valores de L/L_a , devido ao deslocamento do ponto de início de aeração para posições mais de jusante da calha. Assim como, observa-se que com o incremento da vazão, os valores do coeficiente de variação tendem a apresentar valores maiores, indicando translação positiva no eixo vertical. Isso pode ser comprovado na Figura 67, se comparada com a Figura 65.

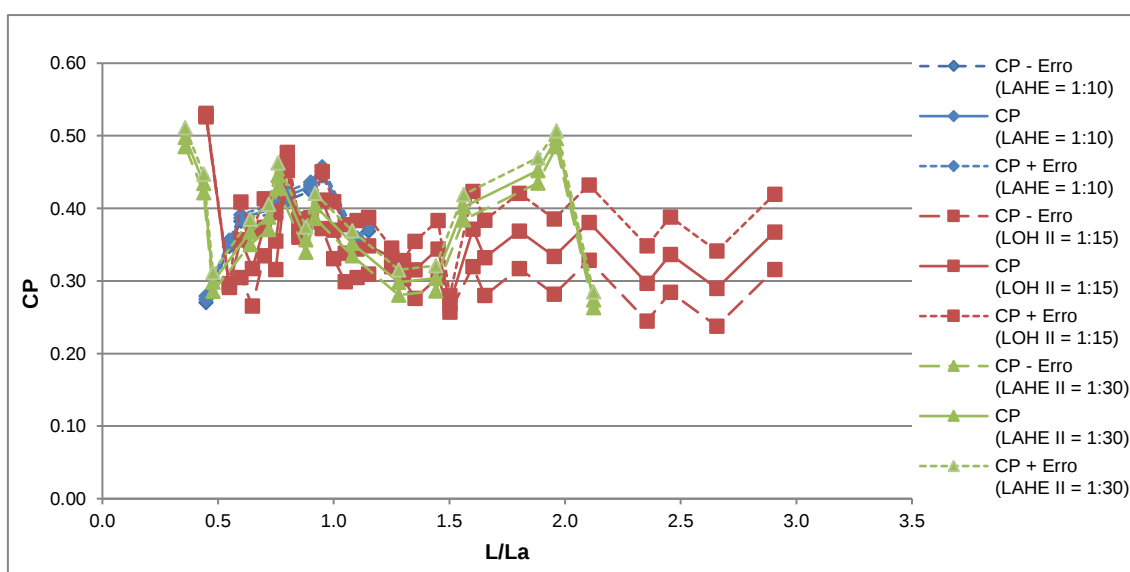


Figura 67 - Comparação da variação do coeficiente de pressão nos patamares, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Para os patamares, as maiores divergências entre as variações de CP verificadas entre o modelo LOH II e LAHE são da ordem de 0,07 para $L/L_a=0,6$. Enquanto as variações extremas poderiam chegar a marca de até 0,13.

Entre os modelos LOH II e LAHE II, na posição $L/L_a=2,1$ a diferença entre os valores de CP são de 0,11; se considerada a condição mais crítica, esta passa para a faixa de 0,20.

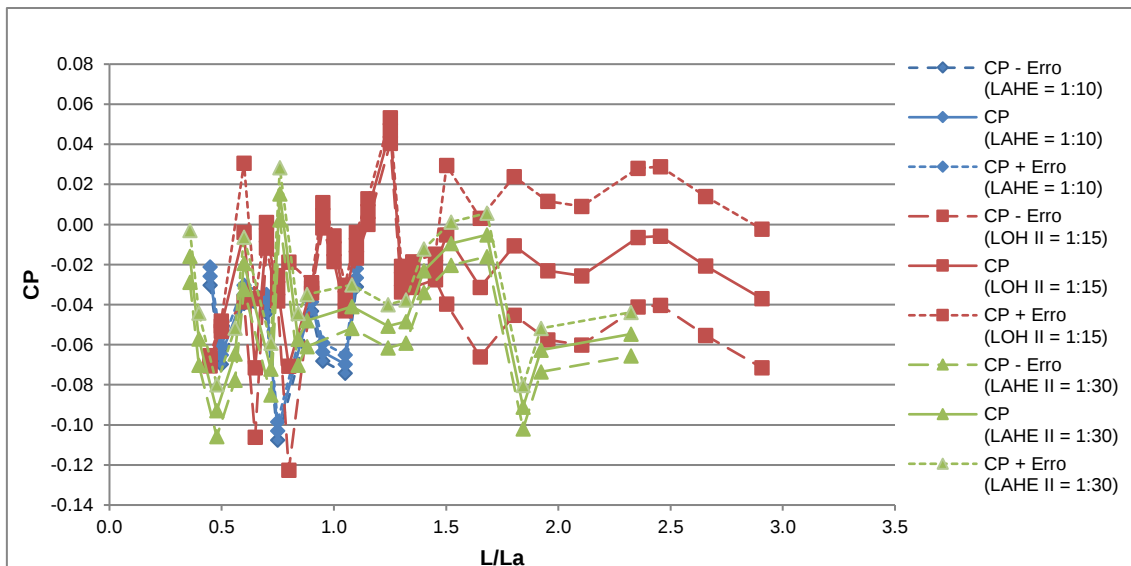


Figura 68 - Comparação da variação do coeficiente de pressão nos espelhos, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/La , para a vazão equivalente de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Para os espelhos as diferenças entre LOH II e LAHE, na posição longitudinal de $L/La=0,6$ são de 0,03. Quando verificada a condição extrema esta diferença pode ser de até 0,07. Na mesma posição adimensional, as diferenças na estimativa do coeficiente de pressão médio entre os modelos LOH II e LAHE II são de 0,02; podendo ser até 0,06.

Em $L/La=2,3$ a diferença entre os valores de CP são de 0,05 e se observada a ampla faixa de variação, podem ser de até 0,09.

Confrontando as Figuras 47 (a) com a Figura 67 nota-se que a possível superestimativa dos valores de CP registrados no modelo LAHE II podem não ser devido a efeitos de escala somente, mas em função dos valores comparativos com o modelo LOH II que por conta dos erros dos transdutores pode ter superdimensionado esta diferença. De maneira semelhante, a análise pode ser replicada entre as Figuras 47 (b) e 68 quando verificada a subestimativa dos valores registrados nos espelhos do modelo LAHE II.

Nos Apêndices Q e R, são apresentados os demais gráficos das comparações entre as variações dos coeficientes de pressão entre os modelos, para a vazão específica de $q_p=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para os patamares e espelhos.

5.3.6 Vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Nas Figuras 69 e 70 são apresentadas as variações dos coeficientes de pressão médios, para patamares e espelhos dos modelos LOH II e LAHE II, com vazão equivalente a $q=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.

Como verificado anteriormente, o eixo horizontal torna-se mais estreito, indicando menor variação nos valores do adimensional L/L_a . Assim como os coeficientes de pressão, que também apresentam menor amplitude.

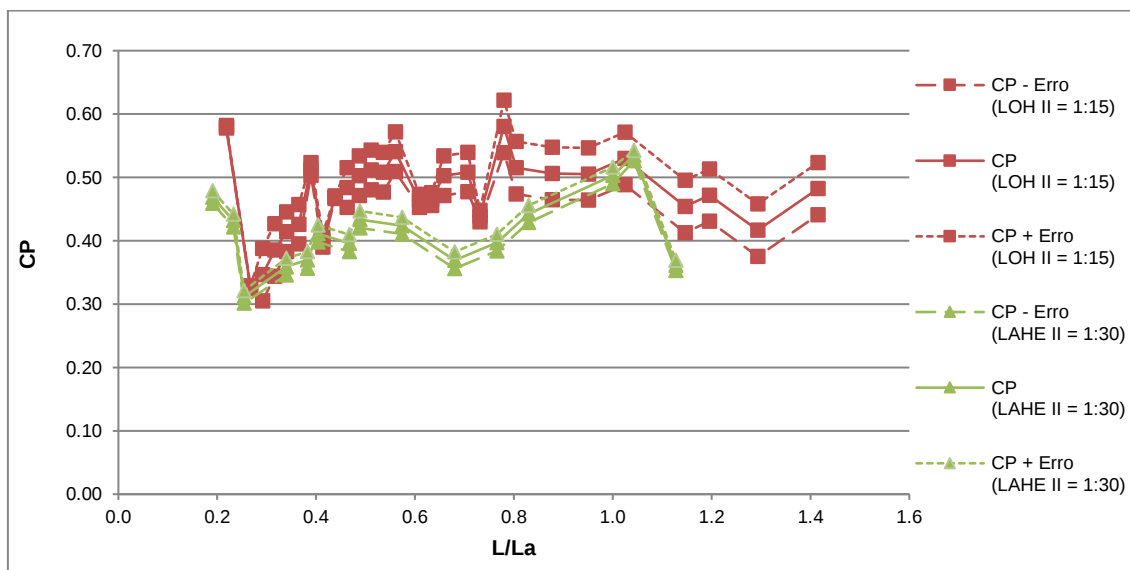


Figura 69 - Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Para os patamares, na posição $L/L_a=0,3$ a variação entre os modelos é de 0,06 podendo atingir a marca de até 0,10. Em $L/L_a=1,1$ a diferença é de 0,09 podendo chegar até 0,14.

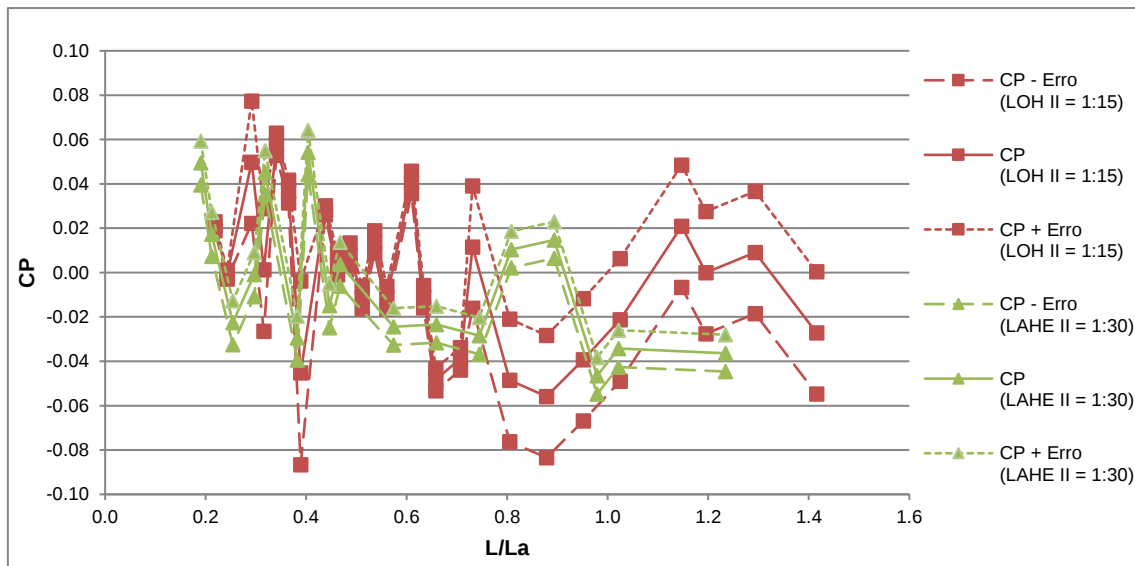


Figura 70 - Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LOH II e LAHE II em função do adimensional L/La , para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$

Nos espelhos, em $L/La=0,4$ a diferença entre os valores de $CP_{\text{méd}}$ do modelo LOH II e LAHE II é de 0,03 mas se verificada a condição mais extrema, esta pode ser de até 0,04.

Em $L/La = 1,2$ a diferença é de 0,04 podendo atingir diferenças com o valor de até 0,07.

Observa-se que para a vazão específica de $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ além da influência nos valores de CP no modelo LOH II para as posições imediatamente a montante e a jusante do ponto de início de aeração, os erros dos transdutores podem causar uma grande diferença entre os valores de CP registrados nas porções não aeradas do escoamento, como se identifica em L/La de 0,39.

Nos Apêndices S e T são apresentados os demais gráficos das comparações entre as variações dos coeficientes de pressão entre os modelos, para a vazão específica de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para os patamares e espelhos.

5.4 Curva de Probabilidade de Não-Excedência de Pressões

Visando identificar a frequência da ocorrência dos valores de carga de pressão extremos, verificados pelos percentis, traçaram-se curvas de probabilidade de não-excedência para os degraus pré-definidos pelos critérios

apresentados no item 4.4.4. A avaliação será realizada conjuntamente entre os três modelos adotados neste estudo, para condição de vazão equivalente igual a $3,1\text{m}^3/\text{s/m}$.

Na Figura 71 é apresentada a curva de probabilidade de não-excedência de pressão extrema para o patamar (degrau 2) e espelho (degrau 3) dos modelos físicos reduzidos, com vazão equivalente a $3,1\text{m}^3/\text{s/m}$.

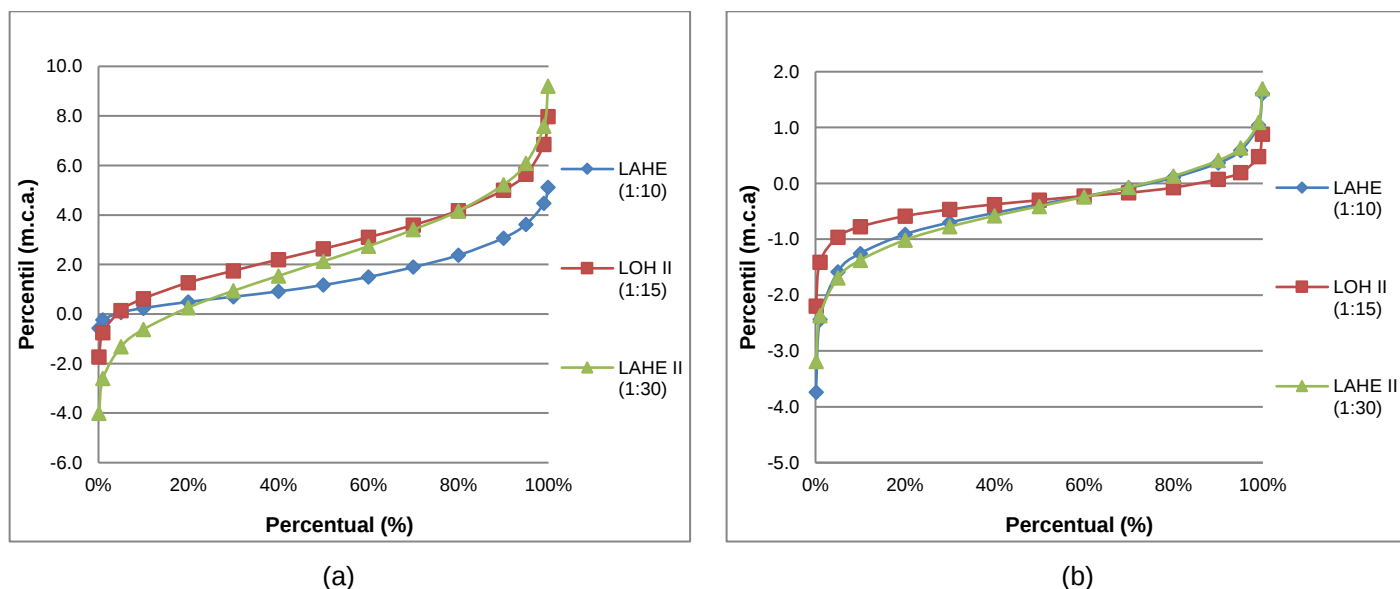


Figura 71 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para os degraus 2 e 3, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s/m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho, respectivamente.

O degrau de número 2 dos patamares dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II corresponde ao degrau mais próximo da ogiva, instrumentado em todos os modelos. O comportamento da distribuição da curva de ocorrência de pressão é apresentado, de modo simultâneo, entre os três modelos na Figura 71 (a).

Observa-se que até a marca de frequência igual a 20%, os valores de carga de pressão registrados no patamar do degrau 2 do modelo LAHE II são inferiores aos demais. Isto significa que em 20% do total do conjunto dos dados de carga de pressão extrema, verificados no modelo LAHE II, os valores são menores ou iguais ao valor de 0,26 m.c.a. Para a mesma marca percentual, o modelo LAHE registrou valores iguais ou inferiores a 0,49 m.c.a. enquanto que, no modelo LOH II valores inferiores a 1,27 m.c.a foram verificados.

Para condições excepcionais, como no caso do valor percentual igual a 0,1%, os valores de carga e pressão extrema observadas no modelo LAHE II

foram menores que -4,0 m.c.a. Já no modelo LOH II e LAHE, foram de -1,73 m.c.a. e de -0,57 m.c.a., respectivamente.

Para as condições de maior ocorrência, com percentual igual a 99,9%, os valores do modelo LAHE II foram os mais extremos, observando valores extremos de até 9,2 m.c.a. Nos modelos LOH II e LAHE as marcas de carga de pressão chegaram até o valor de 8,0 m.c.a. e de 5,12 m.c.a., respectivamente.

Nos patamares, o modelo LAHE apresenta valores de carga de pressão extremas menores em relação ao comportamento observado nos demais modelos, principalmente quanto maior é a ocorrência.

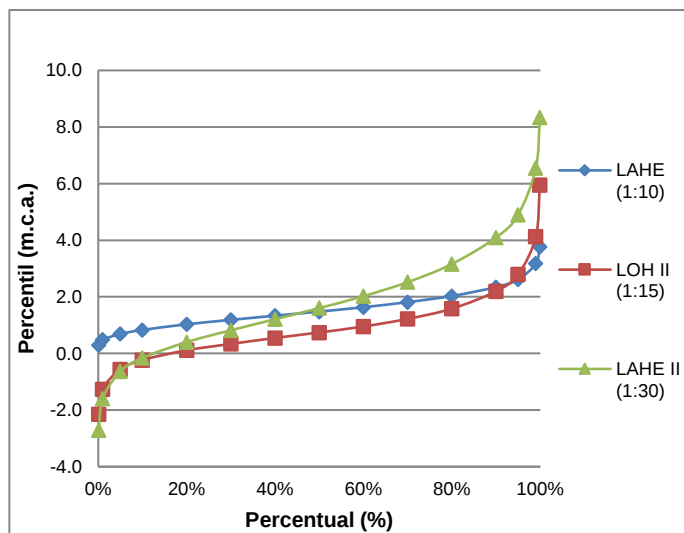
Nos espelhos, o degrau de número 3 foi o primeiro instrumentado, para todos os modelos. O comportamento das curvas de probabilidade de não-excedência de pressão verificadas neste degrau para os três modelos é apresentada na Figura 71 (b).

Verifica-se que nos espelhos, para a condição em que o percentual dos dados é igual a 0,1% os valores registrados pelo modelo LAHE foram os que os que apresentaram valores de carga de pressão menores, com valores de até de -3,7m.c.a. Para os modelos LAHE II e LOH II os valores registrados foram de -3,19m.c.a e de -2,2m.c.a., respectivamente.

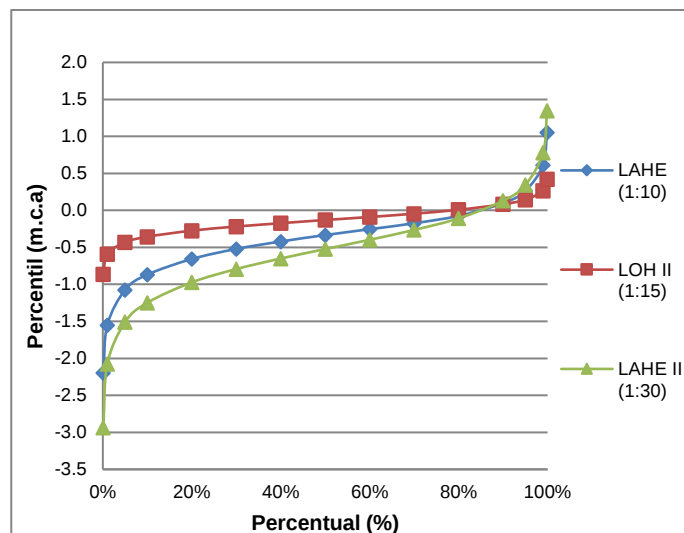
Para os valores de carga de pressão atrelados a um elevado percentual, de não-excedência de 99,9%, os modelos LAHE e LAHE II convergem para a marca de 1,7m.c.a enquanto o modelo LOH II se restringe a valores de até 0,88m.c.a.

Para os espelhos, é possível identificar que os modelos LAHE e LAHE II registram valores mais semelhantes e extremos, do que no modelo LOH II.

Na Figura 72, os degraus instrumentados nos patamares e espelhos dos modelos físicos, imediatamente a montante do ponto de início de aeração verificado no modelo LAHE, são apresentadas.



(a)



(b)

Figura 72 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para o degrau de número 5 dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ para (a) Patamar e (b) Espelho

O degrau de número 5 corresponde, para a vazão equivalente de $3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, ao ponto inserido na região não aerada do escoamento. Tanto no patamar quanto nos espelhos é possível identificar que o modelo LAHE II registra valores mais extremos para os percentis de 0,1% e de 99,9%.

No patamar, conforme mostra a Figura 72 (a) o modelo LAHE registrou até o percentual de 50% valores mais elevados. Para o percentual de 0,1% o valor registrado pelo modelo LAHE é de 0,30 m.c.a. enquanto que no modelo LOH II os valores são de até -2,15 m.c.a e no modelo LAHE II de até -2,71 m.c.a

Para o maior percentual de ocorrência (99,9%) o modelo LAHE registrou valores de até 3,8 m.c.a, o modelo LOH II de até 5,95 m.c.a. e o modelo LAHE II de até 8,34 m.c.a.

No espelho, para o percentual de frequência igual a 0,1%, o valor registrado no degrau 5 pelo modelo LAHE II foi de até -2,94 m.c.a, para o modelo LAHE de até -2,20 m.c.a. e para o modelo LOH II de até -0,87 m.c.a. Para os maiores percentuais (99,9%), os modelos, seguindo a mesma ordem, registraram cargas de pressão extrema de até 1,35 m.c.a, 1,05 m.c.a. e de 0,42 m.c.a.

A Figura 73 apresenta os degraus correspondentes a região imediatamente a jusante do ponto de início de aeração do modelo LAHE. É

notório que as diferenças entre os modelos passam a ser menos significativa quanto aos valores de carga de pressão extremos relacionados com a frequência percentual em que ocorrem.

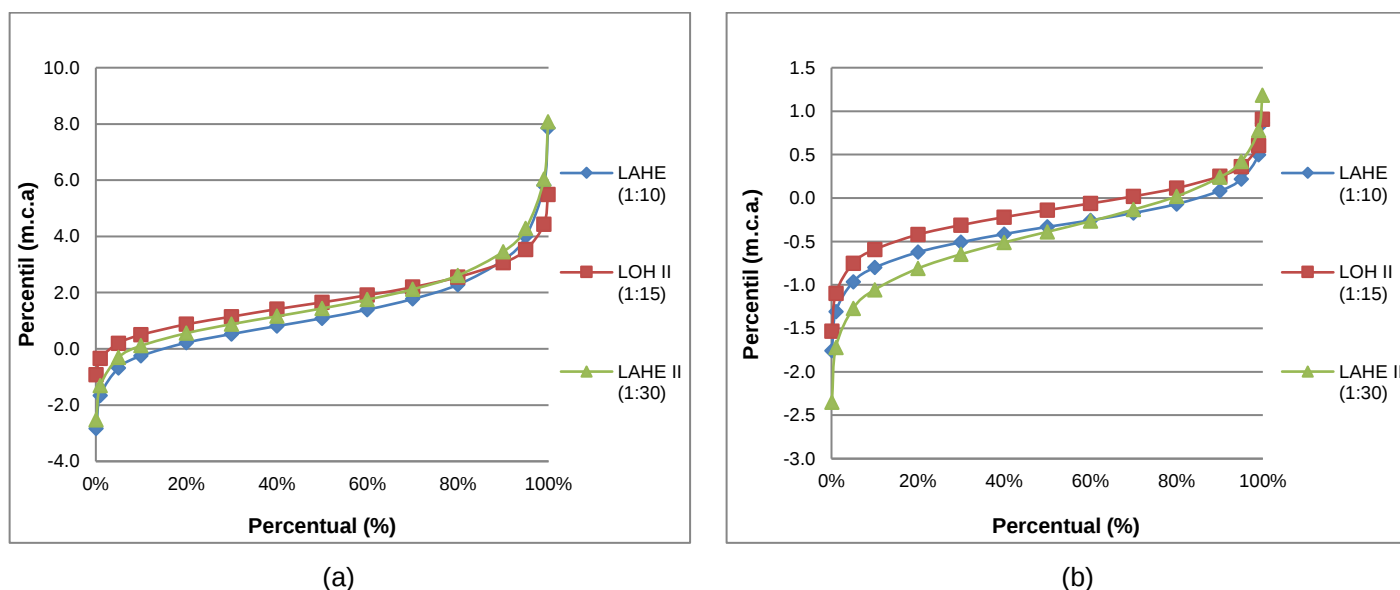


Figura 73 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para os degraus 9 e 8, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho, respectivamente

Para o patamar dos modelos, o degrau de número 9 equivale àquele instrumentado na condição de aeração do escoamento, imediatamente a jusante. É evidente que os três modelos apresentam valores muito semelhantes quanto a carga de pressão extrema, embora o modelo LOH II apresente valores de carga de pressão atenuadas.

Para o percentual de 0,1% o modelo LAHE apresentou valores de até -2,83 m.c.a., ao passo que o modelo LAHE II identificou valores iguais ou inferiores a -2,52m.c.a. e o modelo LOH II de até -0,93m.c.a.

Para o percentual de 99,9% os modelos LAHE e LAHE II identificaram o mesmo limite de carga de pressão extrema, com valores de até 8,08 m.c.a. enquanto o modelo LOH II valores de carga de pressão de até 5,49 m.c.a.

Nos espelhos, o degrau instrumentado na posição imediatamente a jusante do ponto de início de aeração, para os três modelos foi o de número 8. Para percentual de 0,1% nota-se que, a partir da Figura 73 (b), os valores registrados no modelo LAHE II foram de -2,35 m.c.a., no modelo LAHE -1,76 m.c.a. e no modelo LOH II de -1,53 m.c.a. Para o percentual com valor de 99,9% foram verificados valores de carga de pressão de até 1,18 m.c.a. no

modelo LAHE II, de até 0,91 m.c.a. para o modelo LOH II e de até 0,86 m.c.a. no modelo LAHE.

Na Figura 74 são apresentadas as curvas de não-excedência de pressão para os degraus posicionados na região mais a jusante da calha. Neste ponto o escoamento encontra-se totalmente aerado e com características hidráulicas que o condiciona ao regime quase uniforme. Percebe-se que pequenas são as diferenças identificadas entre os valores de carga de pressão extrema verificadas entre os modelos, para o mesmo percentual de ocorrência; sendo ainda menores para os patamares.

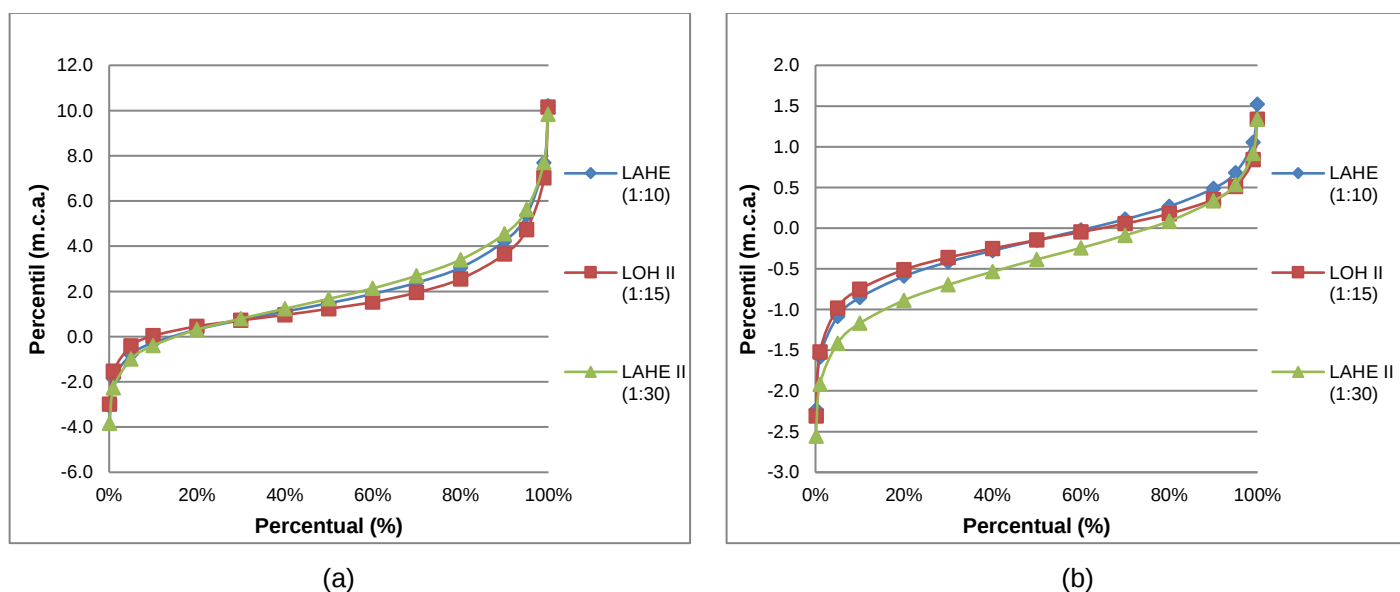


Figura 74 - Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas para os degraus 16 e 15, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=3,1\text{m}^3/\text{s/m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho, respectivamente

Ao verificar os Apêndices U e V, que apresentam as curvas de ocorrência de pressão extrema para as vazões equivalentes de $8,7\text{m}^3/\text{s/m}$ e de $22,3\text{m}^3/\text{s/m}$, identifica-se que com o aumento das vazões, de modo qualitativo, é possível dizer que o comportamento geral observado nos valores de carga de pressão extrema é de aproximação entre os modelos. Ainda, é evidente que na região não aerada nos degraus 2, 3 e 5 o modelo LAHE permanece mais destoante em relação aos demais modelos, principalmente nos patamares dos degraus.

Entretanto, quando avaliado quantitativamente, com base nas máximas diferenças registradas, não é possível manter tal avaliação. De modo a transcrever numericamente o processo que se observa entre os modelos

físicos, para as condições de vazão equivalentes, as tabelas 20 e 21 apresentam as máximas variações dos valores de carga de pressão extremas entre os modelos, com probabilidade de não-excedência de 0,1% e 99,9%, respectivamente.

Tabela 20 – Variações entre os valores de carga de pressão extremos com probabilidade de não-excedência de 0,1%, para as vazões equivalentes de $q=3,1\text{m}^3/\text{s/m}$ $q=8,7\text{m}^3/\text{s/m}$ e $q=22,3\text{m}^3/\text{s/m}$.

Degraus		$\Delta\text{CP}_{0,1\%}$		
		$q=3.1\text{m}^3/\text{s/m}$	$q=8.7\text{m}^3/\text{s/m}$	$q=23.2\text{m}^3/\text{s/m}$
Patamar	2	3.4 (LAHE – LAHE II)	2.7 (LAHE – LAHE II)	3.2 (LOH II – LAHE II)
	5	3.0 (LAHE – LAHE II)	4.1 (LAHE – LOH II)	0.2 (LOH II – LAHE II)
	9	1.9 (LOH II – LAHE)	2.7 (LOH II – LAHE II)	2.6 (LOH II – LAHE II)
	16	0.9 (LOH II – LAHE II)	2.2 (LAHE – LAHE II)	0.8 (LOH II – LAHE II)
Espelho	3	1.5 (LOH II – LAHE)	1.7 (LAHE II – LAHE)	1.5 (LOH II – LAHE II)
	5	2.1 (LOH II – LAHE II)	1.7 (LOH II – LAHE)	0.3 (LOH II – LAHE II)
	8	0.8 (LOH II – LAHE II)	1.7 (LOH II – LAHE)	2.5 (LOH II – LAHE II)
	15	0.3 (LAHE – LAHE II)	0.3 (LAHE II – LOH II)	4.7 (LOH II – LAHE II)

Tabela 21 - Variações entre os valores de carga de pressão extremos com probabilidade de não-excedência de 99,9%, para as vazões equivalentes de $q=3,1\text{m}^3/\text{s/m}$ $q=8,7\text{m}^3/\text{s/m}$ e $q=23.2\text{m}^3/\text{s/m}$.

Degraus		$\Delta\text{CP}_{99.9\%}$		
		$q=3.1\text{m}^3/\text{s/m}$	$q=8.7\text{m}^3/\text{s/m}$	$q=23.2\text{m}^3/\text{s/m}$
Patamar	2	4.1 (LAHE II – LAHE)	5.1 (LAHE II – LAHE)	4.0 (LOH II – LAHE II)
	5	4.6 ((LAHE II – LAHE)	5.2 (LOH II – LAHE)	0.3 (LOH II – LAHE II)
	9	2.6 (LAHE II – LOH II)	3.7 (LAHE – LOH II)	1.9 (LOH II – LAHE II)
	16	0.4 (LAHE – LAHE II)	2.4 (LAHE II – LAHE)	2.3 (LOH II – LAHE II)
Espelho	3	0.8 (LAHE – LOH II)	0.8 (LAHE – LAHE II)	0.4 (LOH II – LAHE II)
	5	0.9 (LAHE II – LOH II)	0.8 (LAHE – LOH II)	0.6 (LOH II – LAHE II)
	8	0.3 (LAHE II – LAHE)	0.1 (LOH II – LAHE)	1.7 (LOH II – LAHE II)
	15	0.2 (LAHE – LOH II)	0.3 (LAHE – LAHE II)	2.7 (LOH II – LAHE II)

Observa-se nas tabelas 20 e 21 que as máximas diferenças entre os modelos ocorrem de forma bastante aleatória, não sendo possível identificar um padrão característico. Deve-se atentar que a coluna referente a vazão de $23,2\text{m}^3/\text{s/m}$ não possui informações de variação carga de pressão extrema para o modelo LAHE, pois por limitação física do modelo vazão equivalentes não puderam ser ensaiadas.

Através da análise das curvas de probabilidade de não-excedência, compilando as constatações verificadas para as três vazões equivalentes, identificou-se que o modelo LAHE, possivelmente, apresenta interferências

quanto a afeitos de escala nos valores de carga de pressão registrados. Assim como é razoável apontar que o modelo LAHE II apresenta valores de carga de pressão extremos em relação aos observados no modelo LOH II.

Atesta-se ainda que as diferenças máximas dos valores de carga de pressão observadas entre os modelos para os percentuais de 0,1% e de 99,9% não tem relação direta com as vazões. No entanto, como apresenta as tabelas 20 e 21, para a mesma vazão, identifica-se que os valores de ΔCP tendem a reduzir nos patamares dos degraus mais a jusante da calha. Nos espelhos observa-se comportamento semelhante, com exceção da vazão equivalente de $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ onde se verifica o aumento dos valores de carga de pressão conforme as posições mais a jusante da calha.

6 Conclusões

Em conformidade ao consenso apresentado na literatura, se observa que as cargas de pressão média aumentam com a vazão, tanto nos patamares quanto nos espelhos. Observa-se ainda que quanto maior o fator de redução, mais extremos são os valores registrados.

Ao avaliar as cargas de pressão extremas com probabilidade de não-excedência de 0,1%, se identificou que quanto maiores as vazões ensaiadas em cada modelo, menores são os valores mínimos de carga de pressão. Os menores valores foram registrados nos espelhos dos degraus, atingindo no modelo LAHE, de escala 1:10, valores de até -9 m.c.a quando convertidos para a escala de protótipo. Já os modelos LOH II e LAHE II, com escala de redução de 1:15 e 1:30, respectivamente, registram valores mínimos nos espelhos de até -14,3 m.c.a e de -13,8 m.c.a. Cabe destacar que valores inferiores ao ponto de vaporização da água, menores que -10,33 m.c.a. não tem sentido físico, entretanto indicam que nestas situações existe o potencial risco de ocorrência de cavitação.

Para os valores extremos máximos observou-se que quanto maiores as vazões, maiores foram os valores de carga de pressão verificados. Os valores mais intensos foram registrados nos patamares, com 15 m.c.a no modelo LAHE, 29,4 m.c.a. no modelo LOH II e de 36,5 m.c.a para o modelo LAHE II.

Quando comparadas as informações do campo de pressão na forma adimensional, simultaneamente entre os três modelos, observou-se que através da relação $L_a/K \times F^*$ os modelos LAHE e LOH II não apresentam distorções significativas. Ao passo que, o modelo LAHE II apresenta maior variação em relação aos valores de L_a/K para os mesmos números de Froude rugoso. Isto indica que em modelos físicos reduzidos com elevado fator de escala a identificação do ponto de início de aeração ocorre em posições mais a jusante da calha por sofrer influência do tamanho do degrau, atribuída à redução da macrorrugosidade do degrau.

Após verificar as diferentes relações adimensionais, nota-se que para os coeficientes de pressão CP em função do adimensional de posição L/L_a o comportamento entre os modelos oscila conforme a variável em análise e a vazão equivalente. Contudo, com base nas discussões apresentadas nesta

pesquisa é possível identificar que o modelo LAHE II (escala 1:30) apresenta valores extremos de CP.

Ao analisar as cargas de pressão média na forma adimensional CP, identificou-se que nos patamares dos degraus o modelo LAHE II superestimou os valores de CP para as posições a montante do ponto de início de aeração, assim como também para a zona aerada do escoamento. No entanto, na máxima vazão, equivalente a $23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, ocorreu o inverso, o modelo LAHE II subestimou os valores de CP. Nos espelhos, o modelo LAHE II subestimou os valores de CP, tanto na porção não aerada quanto na aerada, especialmente para as posições mais de jusante da calha.

Quando verificadas as flutuações de pressão na forma adimensional captou-se efeito de escala do modelo LAHE II, com tendência a superestimar os valores de CP_{σ} para os patamares e também nos espelhos dos degraus.

O modelo LAHE II subestimou os valores extremos mínimos, com probabilidade de não-excedência de 0,1%, para os patamares e espelhos e superestimou os valores extremos máximos, com probabilidade de não-excedência de 99,9% nos patamares e espelhos.

Assim como, de modo complementar, é observado nas curvas de probabilidade de não-excedência, que apresentam graficamente as diferenças quanto a frequência percentual e que pelo fato de não se identificar um comportamento padrão, impedem a formulação de uma conclusão mais específica quanto aos efeitos de escala observados entre os modelos. Entretanto, a partir desta análise identificou-se que o modelo LAHE apresenta interferências quanto a efeitos de escala nos valores de carga de pressão registrados na região não aerada do escoamento, principalmente nos patamares dos degraus.

Além das diferenças devido aos erros dos equipamentos, a influência de variáveis secundárias como o diâmetro da tomada de pressão podem ter afetado no registro das informações de carga de pressão.

Desta maneira, com base nos apontamentos acima descritos e corroborando com a recomendação de Chanson (2000), o presente estudo identifica que existe efeito de escala entre os modelos utilizados, especialmente para a escala de 1:30.

Recomenda-se que investigações experimentais em modelos físicos reduzidos de vertedouros em degraus sejam realizadas com escalas de redução de até 1:15. Assegurando, desta maneira, a confiabilidade das informações quanto as cargas de pressão, sem a interferência de efeitos de escala, e ao mesmo tempo otimizando aspectos de custo financeiro e físico das instalações.

Deve-se destacar que, possivelmente, escalas intermediárias com fator de redução (λ) entre 15 e menores que 30, também possam não apresentar efeitos de escala. Portanto, sugere-se que tais verificações sejam avaliadas em estudos futuros.

Referências

Amador, A. **Comportamiento Hidráulico de los Aliviaderos Escalonados en Presas de Hormigón Compactado**. 2005. 244 f. Phd thesis, Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2005.

AMADOR, A.; SÁNCHEZ-JUNY, M.; DOLZ, J. Diseño Hidráulico de Aliviaderos Escalonados en Presas de HCR. **Ingeniería del Agua**, Valencia, v. 13, n.3, dez. 2006, p 289-302.

ANDRÉ, Margarida; RAMOS, Pedro; MATOS, Jorge. Dissipação de Energia em Descarregadores de Cheia em Degraus. Aplicação a Descarregadores com Largura Constante e com Paredes Convergentes. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7., 2004, Lisboa. **Anais...** . Lisboa: Aprh, 2004. p. 1 - 10.

ANDRIOLO, F. Aspectos Sobre o Uso de CCR em Barragens Brasileiras. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROLLER COMPACTED CONCRETE (RRC) DAMS, 7., 2015, Chengdu. **Anais...** , Chengdu, 2015. p. 1 – 96.

ARANTES, Eudes José. **Caracterização do escoamento sobre vertedouros em degraus via CFD**. 2007. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.

ARAS, E.; BERKUN, M. Comparison of Stepped and Smooth Spillway Effects on Stream Reaeration. **Water SA**, v. 36, n. 3, abr. 2010, p. 309 - 314.

ARAUZ, Ivan Juncioni de. **Vertedor de superfície e escoamento sob comportas**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

BAPTISTA, Márcio; LARA, Márcia. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010. 473 p.

BOES, R. M.; HAGER, W. H. Hydraulic Design of Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 129, n. 9, p. 671-679, 2003.

BORJA, João Gerdau de. **Análise das características macroturbulentas ao longo de uma bacia de dissipação por ressalto hidráulica à jusante de um vertedouro em degraus**. 2009. 82 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

BRITO, R. J. R. **Análise da Aeração em Escoamentos de Altas Velocidades em Calhas de Vertedores**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

CHAFI, C.; HAZZAB, A.; SEDDINI, A. Study of Flow and Energy Dissipation in Stepped Spillways. **Jordan Journal of Civil Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1 – 11, 2010.

CHAMANI, M. R.; RAJARATNAM, N. Characteristics of Skimming Flow over Stepped Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 125, n. 4, p. 361-368, 1999.

CHANSON, H. Comparison of Energy Dissipation between Nappe and Skimming Flow Regimes on Stepped Chutes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 32, n. 2, p. 213 – 219, 1994a.

CHANSON, H. Hydraulics of Skimming Flows over Stepped Channels and Spillways. **Journal of Hydraulic Research**. IAHR, v. 32, n. 3, p 445-460. 1994b.

CHANSON, H. Physical Modelling, Scale Effects And Selfsimilarity Of Stepped Spillway Flows. In: World Environmental And Water Resources Congress: Ahupua'A, 2008, Honolulu. **Anais...** . Honolulu: Asce, 2008. p. 1 - 10.

CHANSON, H. Self-Aerated Flows on Chutes and Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, v. 119, n. 2, p. 220-243, 1993.

CHANSON, H. The Hydraulics of Open Channel Flow. **Physical modelling of hydraulics**. Londres: Arnold. P 261-283. 1999.

CHANSON, H.; GONZALEZ ,C. A. Physical modelling and scale effects of air-water flows on stepped spillways. **Journal Of Zhejiang University Science**. Hangzhou, p. 243-250. jan. 2005.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. Air-Water Flows Down Stepped Chutes: Turbulence and Flow Structure Observations. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 28, n. 11, pp. 1737-1761, 2002.

CHANSON, H.; TOOMBES, L. Hydraulic of Stepped Chutes: The Transition Flow. **Journal of Hydraulic Research**, v. 42, n. 1, p 43-54, 2004.

CONTERATO, Eliane. **Escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Declividade 1V:0,75H: Caracterização das Pressões e Condições de Aeração**. 2011. 69 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

CONTERATO, Eliane. **Determinação de Critérios de Dimensionamento de Soleira Terminal em Bacia de Dissipação a Jusante de Vertedouro em Degraus**. 2014. 156 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

DAI PRÁ, Mauricio et al. Dissipação de energia do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus de declividade 1V:1H. **Ingeniería del Agua**, v. 20, n. 1, p.1-12, 28 jan. 2016.

DAI PRÁ, Mauricio et al. Um Estudo sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. **Revista Recursos Hídricos**, Lisboa, v. 33, n. 1, p.17-28, maio 2012.

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

DAI PRÁ, Mauricio. **Uma Abordagem para Determinação das Pressões Junto ao Fundo de Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico**. 2011. 208 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DANTAS, Jéssica Beatriz; SILVA, Djair Félix da. Vertedores e sua Relevância nas Usinas Hidrelétricas. **Ciências Exatas e Tecnológicas**, Maceió, v. 3, n. 3, p.241-250, nov. 2016.

GOMES, Ana Paula. **Efeito de Ondas em Margens a Jusante de Dissipadores de Energia por Ressalto Hidráulico**. 2018. 241 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

GOMES, Jaime Federici. **Campo de Pressões: Condições de Incipiência à Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H**. 2006. 229 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GOMES, Jaime Federici et al. Condições de Ocorrência de Cavitação em Vertedouros em Degraus com Declividade 1V:0,75H, Estudo a Partir do Campo de Pressões. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 22, 2006, Ciudad Guayana. **Anais...** . Buenos Aires: INA, 2006. p. 1 - 10.

GONZALES, C. A.; TAKAHASHI, M.; CHANSON, H. An Experimental Study of Effects roughness in Skimming Flows on Stepped Chutes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 46, Edição Extra n. 1, p. 24-35, 2008.

HELLER, Valentin. Scale Effects in Physical Hydraulic Engineering Models. **Journal of Hydraulic Research**, v. 49, n.3, p. 293-306, 2011.

KOSITGITTIWONG, D. **Validation of Numerical Model of the Flow Behaviour through Smooth and Stepped Spillways using Large-scale Physical Model**. 2012. 115 f. Tese (Pós-Doutorado em Engenharia Civil) Faculdade de Engenharia, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok, 2012.

LOBOSCO, R. J. **Investigação Teórico-Numérica da Aeração em Estruturas de Vertedouros em Degraus com Uso de Software Livre**. 2013. 149 f. Tese (doutorado em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Paulo, Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, 2013.

LOBOSCO, R. J. *et al.* Análise Computacional da Aeração em Escoamentos Bifásicos sobre Vertedouros em Degraus. In: Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, 6. e Congresso de Engenharia de Moçambique, 3., 2011, Maputo. **Anais [...]**. Maputo: Edições INEGI, 2011, v. 1, p. 1-10.

LOBOCO, R.J.; SCHULZ, H. E. Análise Computacional do Escoamento em Estruturas de Vertedouro em Degraus. **Mecánica Computacional**, Buenos Aires, v. XXIX, p. 3593-3600, 2010.

LOPES, P. *et al.* Alternating Skimming Flow Over a Stepped Spillway. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 17, n. 2, p. 303-322, 2016.

MELO, Ladislao Roger Ticoná. **Monitoração de Modelos Físicos Reduzidos para Investigação do Comportamento de Estruturas em Escala Real**. 2011. 242 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica de São Paulo, Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MIRZA, M. J. O. *et al.* Effect of an abrupt slope change on air entrainment and flow depths at stepped spillways. **Journal of Hydraulic Research**, v. 55, n. 3, p. 362-375, 2017.

MORAES, Alisson Gomes de. **Desenvolvimento e validação de um modelo conceitual de aeração em vertedores**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEIDERT, S. H. Desempenho de Vertedores – Dissipação de Energia, Cavitação e Erosão. Apresentado em: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 13, Rio de Janeiro, Abr. 1980. Curitiba; CEHPAR; 1980. 48 p.

NOVAK, Pavel *et al.* **Hydraulic modelling – an introduction**: principles, methods and applications. New York: Spon Press, 2010. 616 p.

NOVAKOSKI, Carolina Kuhn. **Análise da Distribuição Longitudinal das Pressões em um Ressalto Hidráulico Formado a Jusante de Vertedouro em Degraus**. 2016. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

OSMAR, Fabrício Machado. **Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2016. 84 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PIASENTIN, Corrado. **Curso Segurança de Barragens**. Agência Nacional de Águas (ANA). 2013. 80p. (Módulo I – Barragens: Aspectos Legais, Técnicos e Socioambientais. Unidade 3: Aspecto de Projeto, Construção, Operação e Manutenção de Barragens).

PINTO, Miguel Mota Medeiros. **Dissipação de energia em descarregadores de cheias em degraus com soleira em teclado piano: estudo experimental**. 2017. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico de Lisboa, Lisboa, 2017.

PORTO, Rodrigo De Melo. **Hidráulica Básica**. São Paulo: Editora São Carlos - EESC USP, 2006. 519 p.

PRESSER, Felipe Correia et al. Coeficientes de Pressões Médias em Vertedouros em Degraus. In: XXVII CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 27., 2016, Lima, Peru. **Anais...** . Buenos Aires: IAHR 2016.

RAJARATNAM, N. Skimming Flow in Stepped Spillway. **J. Hydraul. Eng.**, v. 116, n. 4, p. 587-59, 1990.

ROSELLI, Rafael Gustavo. **Extravasor Labirinto em Aproveitamentos Hidrelétricos**. 2012. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade Federal de São Paulo, São Paulo, 2012.

SANAGIOTTO, D. G. et al. Aeração em um Vertedouro em Degraus com declividade de 0,75H:1,0V. In: XXV Seminário Nacional de Grandes Barragens. 25., Salvador. **Anais...** Rio de Janeiro: Comitê Brasileiro de Barragens, 2003. p. 1 – 9.

SANAGIOTTO, Daniela Guzzon. **Análise da Macroturbulência do Escoamento em Escadas para Peixes por Bacias Sucessivas**. 2007. 320 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SANAGIOTTO, Daniela Guzzon. **Características do escoamento sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H**. 2003. 137 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SANAGIOTTO, Daniela; MARQUES, Marcelo. Características do Escoamento em Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:0,75H. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p.17-31, 2008.

SÁNCHEZ JUNY, M.; POMARES, J.; DOLZ, J. Pressure field in skimming flow over a stepped spillway. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON HYDRAULICS OF STEPPED SPILLWAYS, 1., 2000, Zurich. **Anais...** Zurich: Balkema, 2000. p. 137 - 146.

SIMÕES, André Luiz Andrade. **Considerações sobre a hidráulica de vertedores em degraus**: Metodologias adimensionais para pré-dimensionamento. 2008. 258 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

SIMÕES, André Luiz Andrade. **Escoamentos Turbulentos em Canais com o Fundo em Degraus: Resultados Experimentais, Soluções Numéricas e Proposições Teóricas**. 2012. 528 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SIMÕES, André Luiz Andrade; PORTO, Rodrigo de Melo; SCHULZ, Harry Edmar. Uma Síntese Acerca de Estudos em Hidráulica de Canais e Vertedores em Degraus. In: XVIII Simpósio Brasileiro De Recursos Hídricos, 18., 2009, Campo Grande. **Anais...** Porto Alegre: ABRH, 2009. p. 1 - 20.

SORENSEN, R. M. Stepped Spillway Hydraulic Model Investigation. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, New York, v. 111, n. 12, p. 1461-1472, 1985.

SOUZA, F. L. T. **Caracterização do Escoamento em um Vertedor Tipo Flauta (Poço-Galeria) por meio de Modelagem Física e Numérica – Estudo de Casos**. 2015. 88 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva et al. Efeitos de Escala em Escoamentos Sobre Vertedouros em Degraus: Investigação Numérica e Computacional. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 28., 2018, Buenos Aires. **Anais...** . Buenos Aires: IAHR, 2018. p. 3023 - 3034.

TEIXEIRA, Eder Daniel. **Efeito de Escala na Previsão dos Valores Extremos de Pressão junto ao fundo em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico**. 2008. 319 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

TERRIER, S. **Hydraulic Performance of Stepped Spillway Aerators and Related Downstream Flow Features**. 2016. 339 f. Tese (Doutorado). École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Lausanne, 2016.

TOZZI, Marcos José; OTA, José Junji. Vertedouros em Degraus. **da Vinci**, Curitiba, v. 1, n. 1, p.9-27, 2004.

TURELLA, Débora Saccaro. **Critérios de Dimensionamento para Bacia de Dissipação por Ressalto Hidráulico Tipo I**. 2010. 86 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

USBR, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation. **Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis**: VI-3. Cavitation Damage Induced Failure of Spillways. 2015. Disponível em: <https://www.usbr.gov/ssle/damsafety/risk/BestPractices/Chapters/VI-3-20150610.pdf>. Acesso em: 15 maio 2018.

WIEST, Rafael André. **Avaliação do campo de pressões em ressalto hidráulico formado a jusante de um vertedouro com diferentes graus de submergência**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

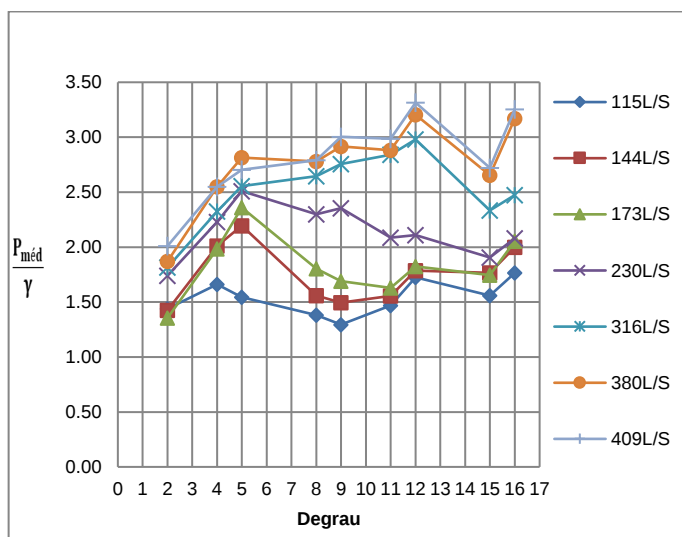
WU, J.; LUO, C. Effects of Entrained Air Manner on Cavitation Damage. **Journal of Hydrodynamics**, v. 23, n. 3, p. 333-338, 2011.

WUTHRICH, D.; CHANSON, H. **Aeration and Energy Dissipation over Stepped Gabion Spillways: A Physical Study**. Brisbane: The University of Queensland. 2014. p. 173.

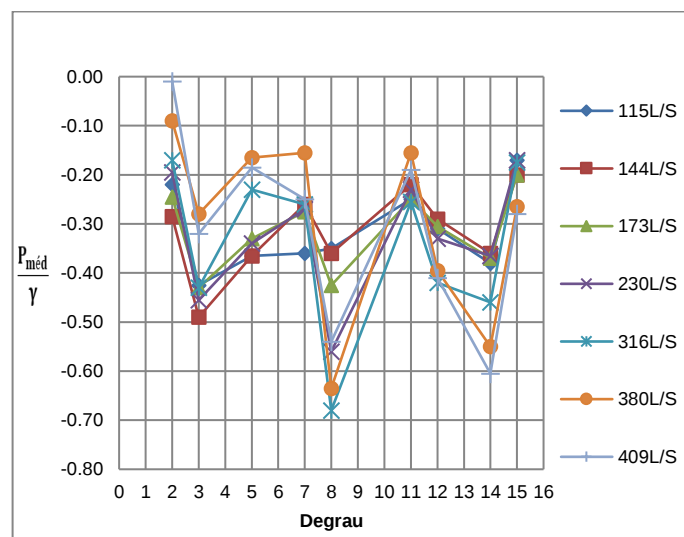
ZUCH, Roberto Arsego. **Manifestações Patológicas nas Estruturas em Concreto de Usinas Hidrelétricas: Levantamento de Ocorrências e Estratégias de Reparo Utilizadas**. 2008. 76 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Apêndices

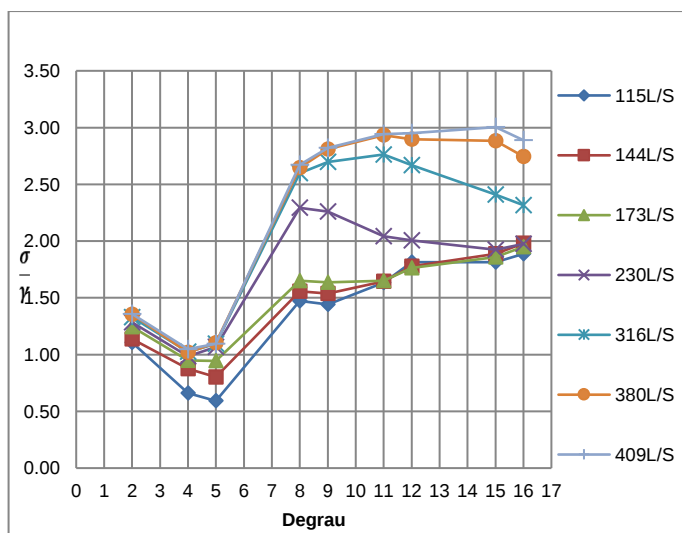
Apêndice A - Comportamento longitudinal das cargas de pressão, ao longo da calha escalonada do modelo LAHE (1:10) para (a) Patamar e (b) Espelho.



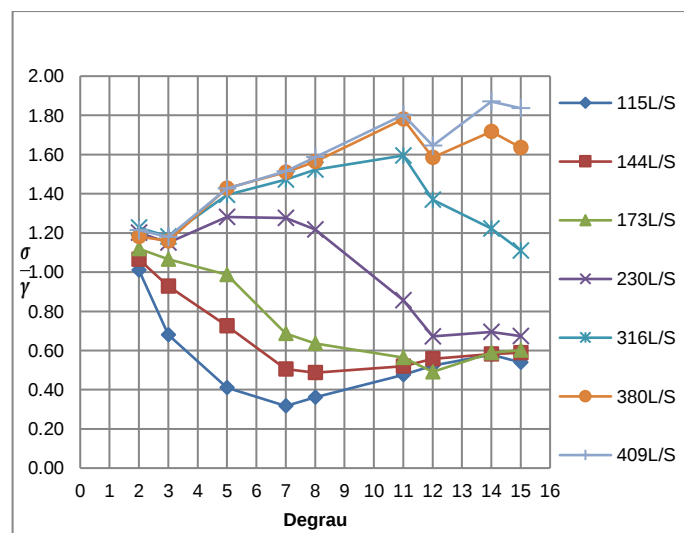
(a)



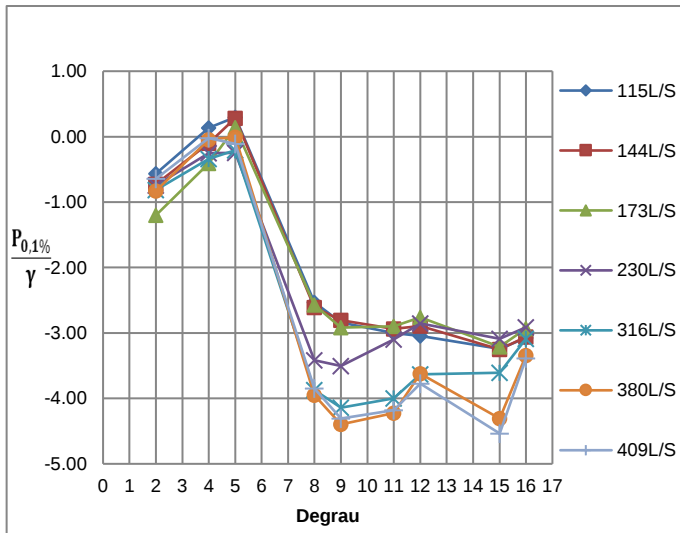
(b)



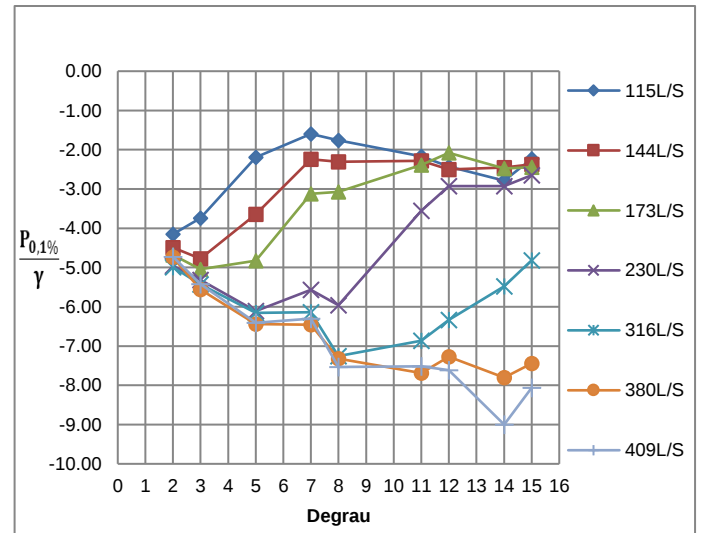
(a)



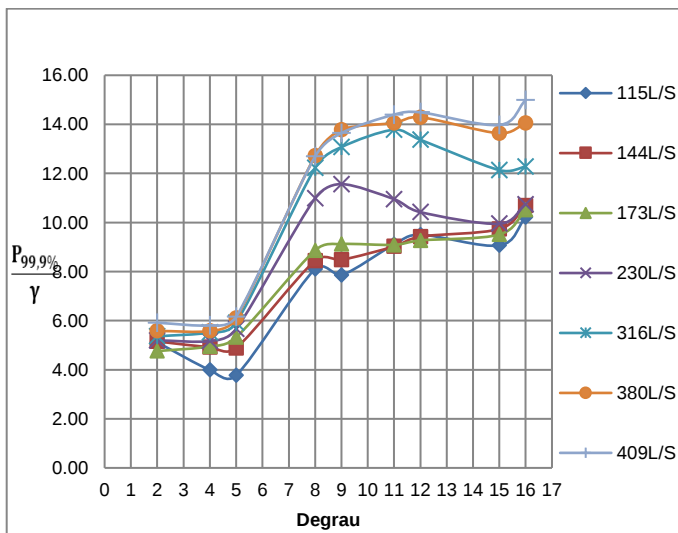
(b)



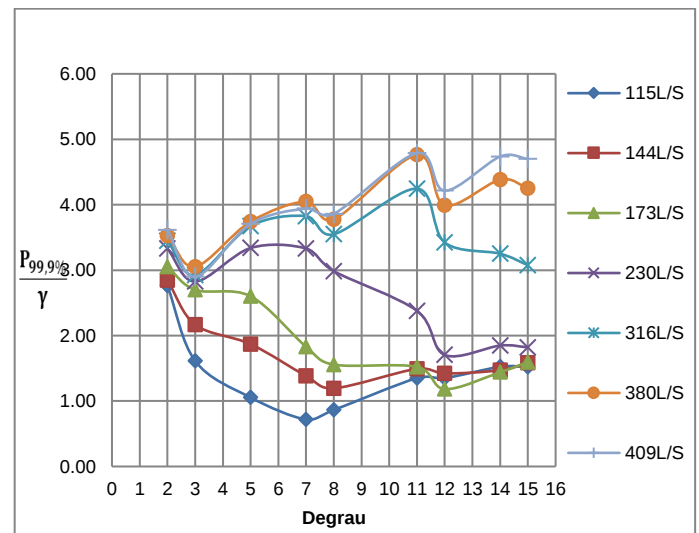
(a)



(b)

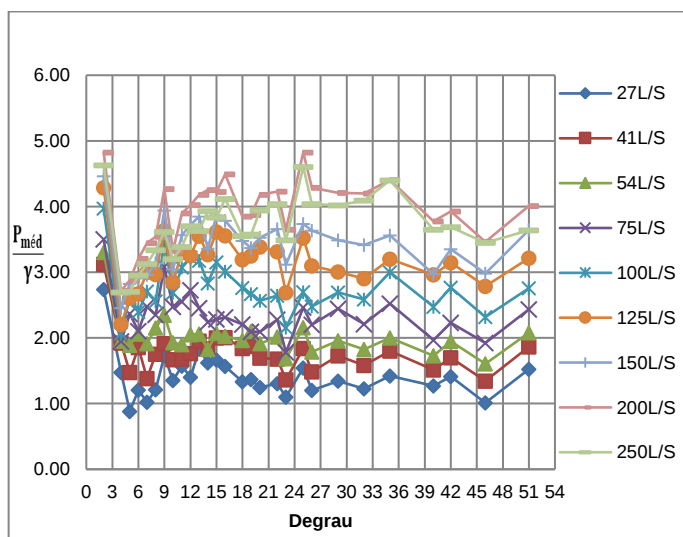


(a)

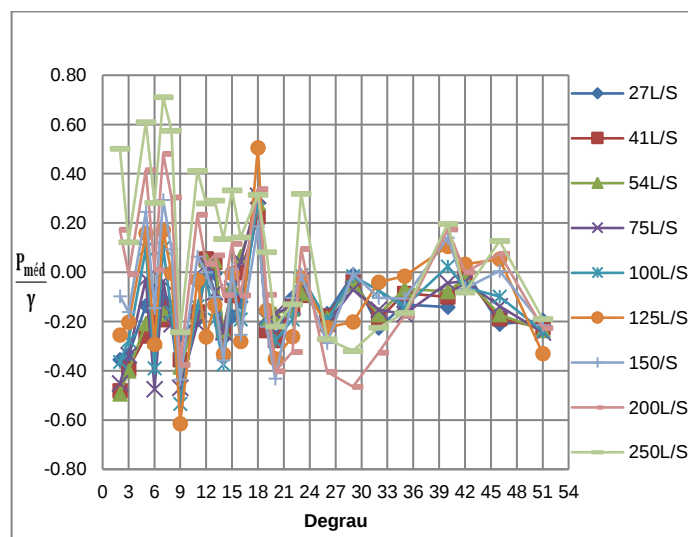


(b)

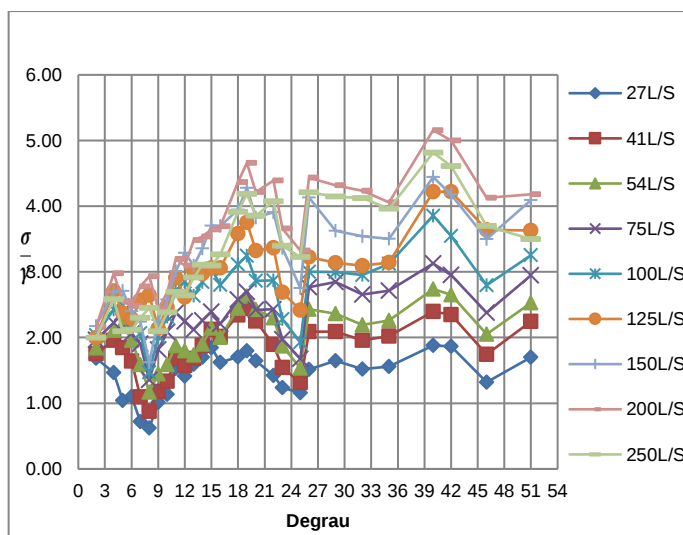
Apêndice B – Comportamento longitudinal das cargas de pressão, ao longo da calha escalonada do modelo LOH II (1:15), para (a) Patamar e (b) Espelho.



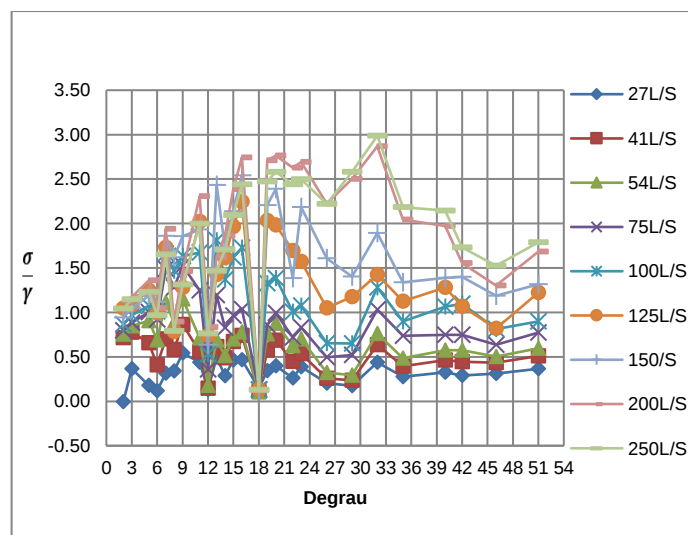
(a)



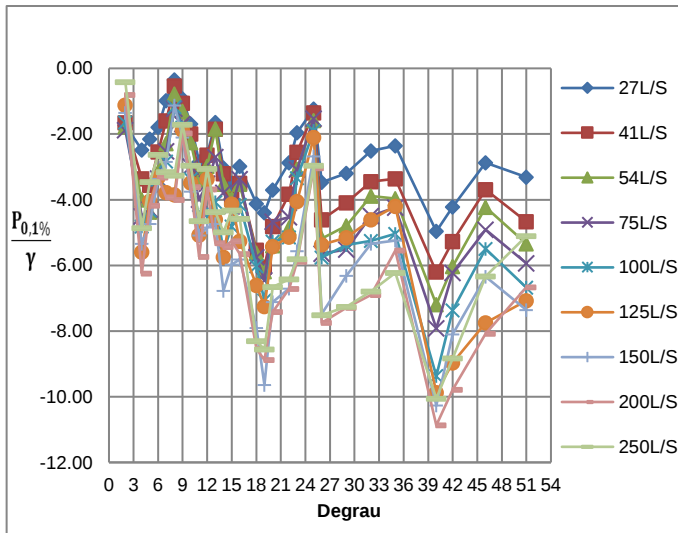
(b)



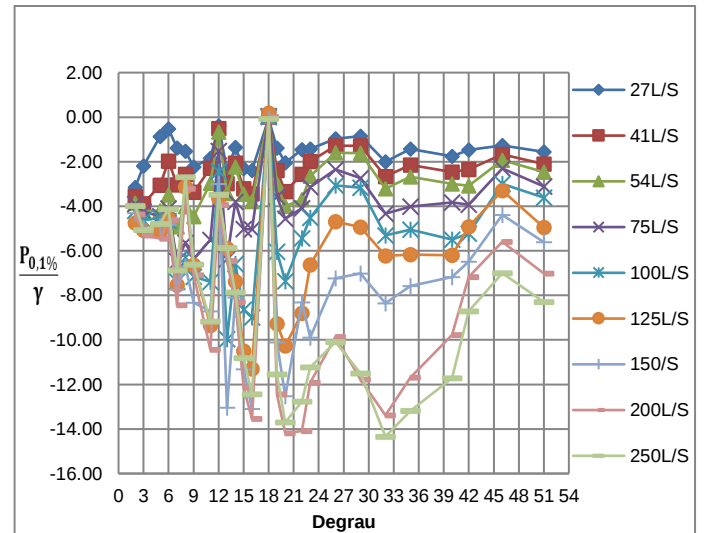
(a)



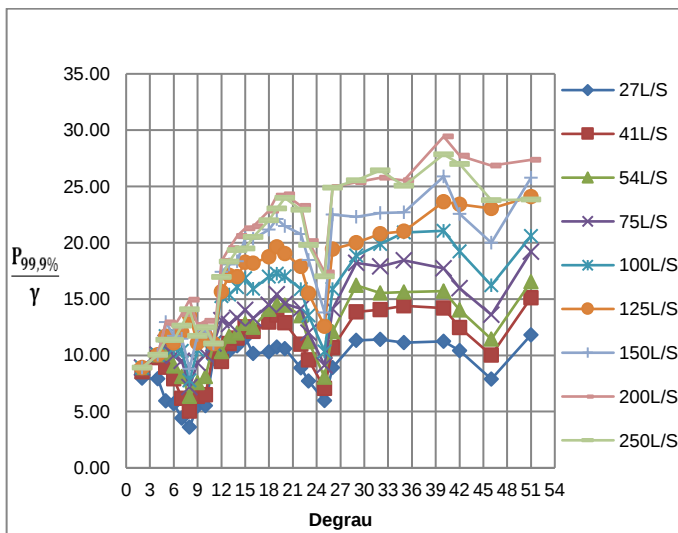
(b)



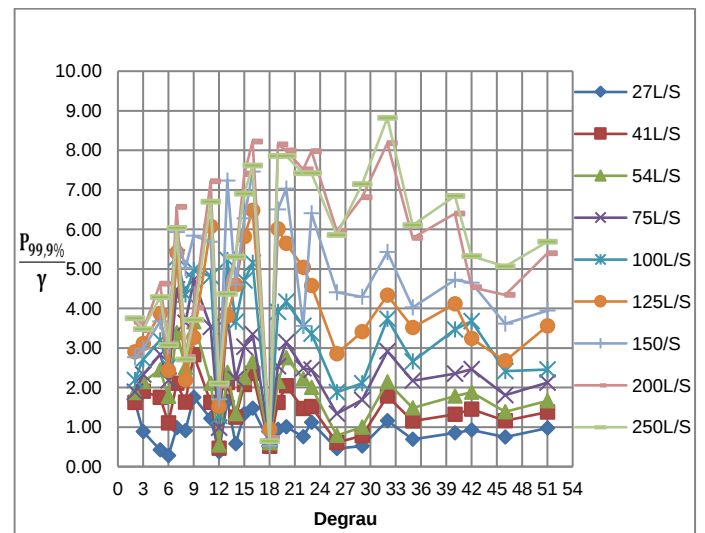
(a)



(b)

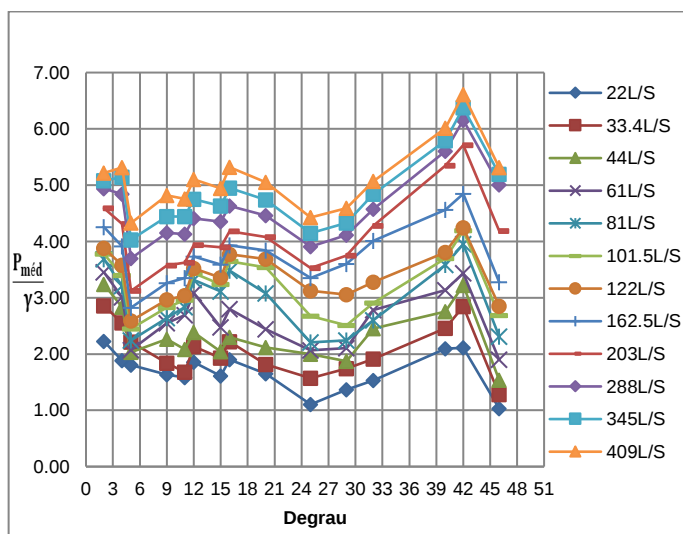


(a)

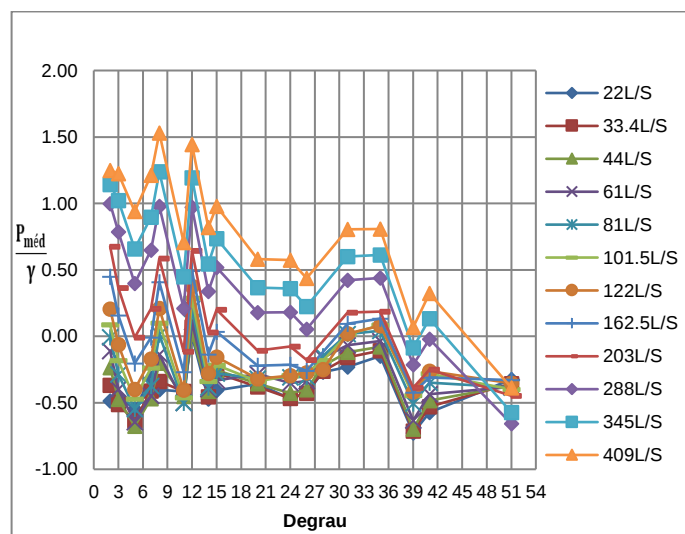


(b)

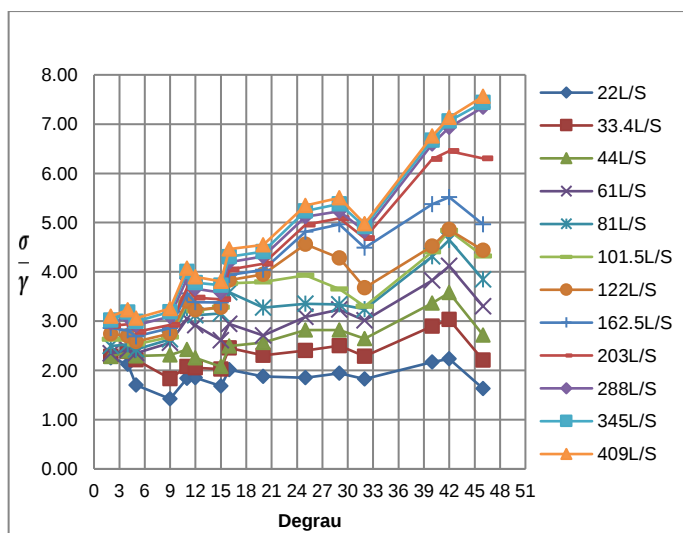
Apêndice C – Comportamento longitudinal das cargas de pressão, ao longo da calha escalonada do modelo LAHE II (1:30), para (a) Patamar e (b) Espelho.



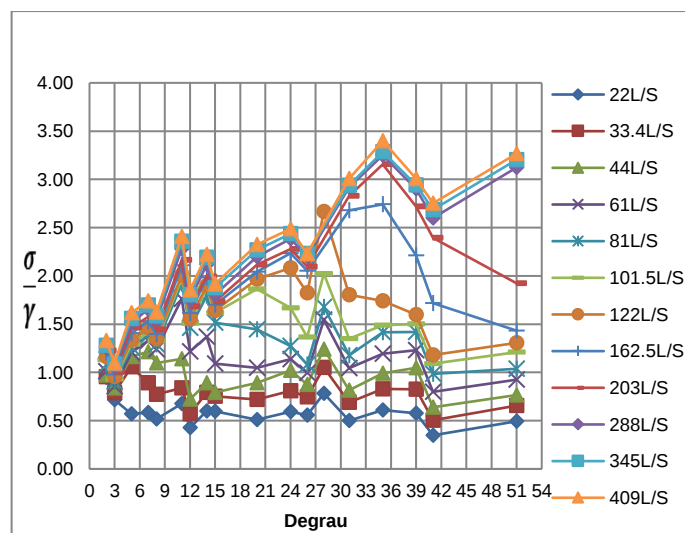
(a)



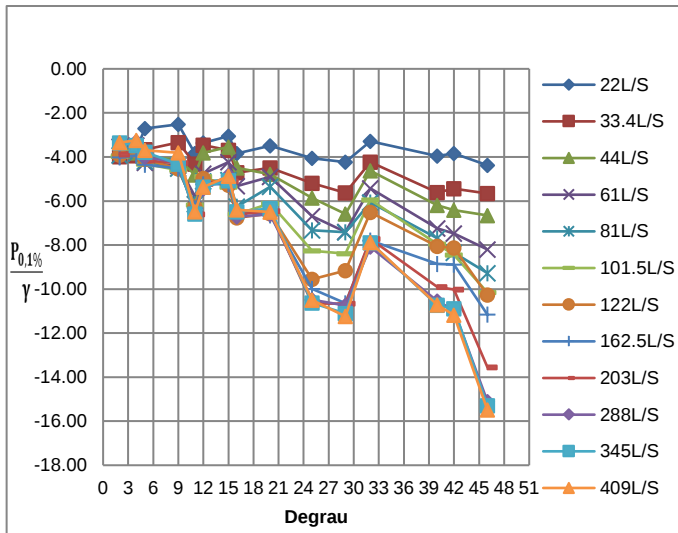
(b)



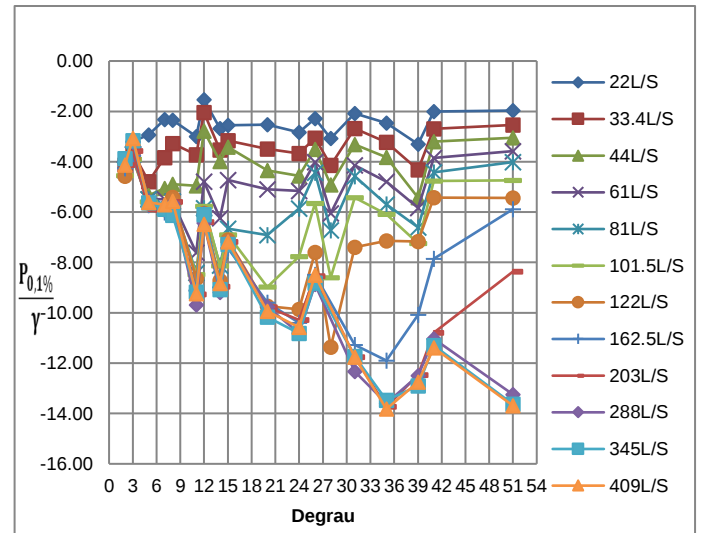
(a)



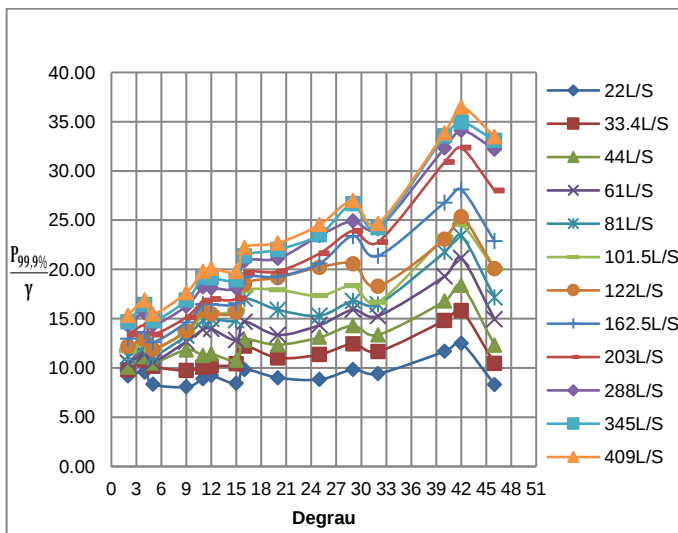
(b)



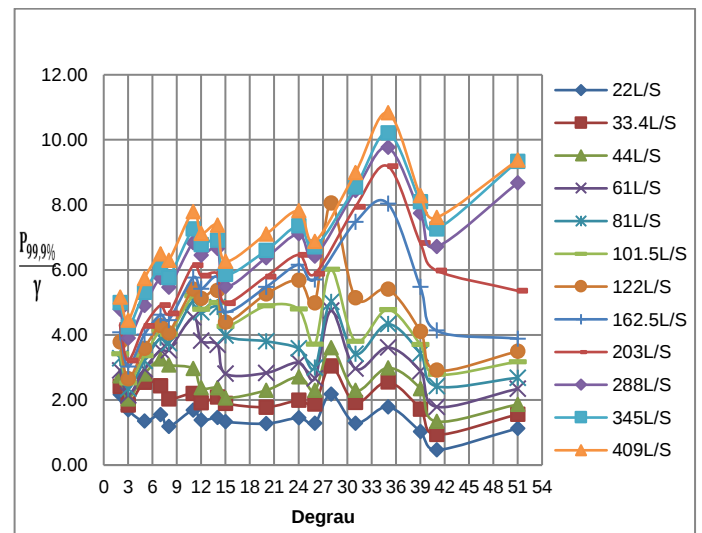
(a)



(b)

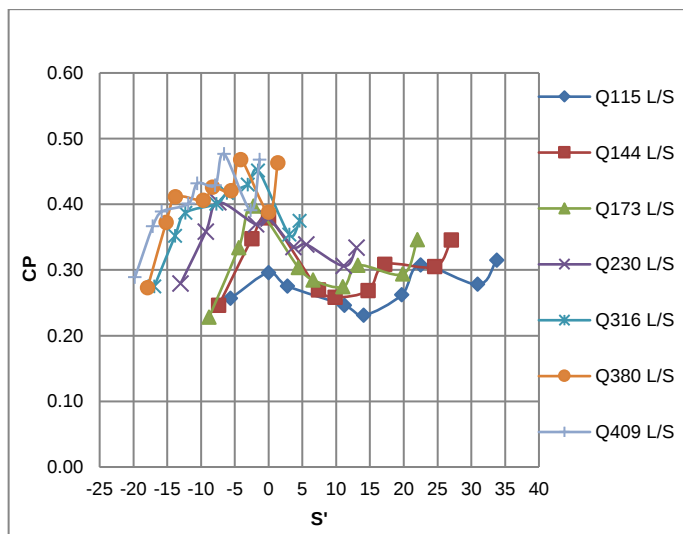


(a)

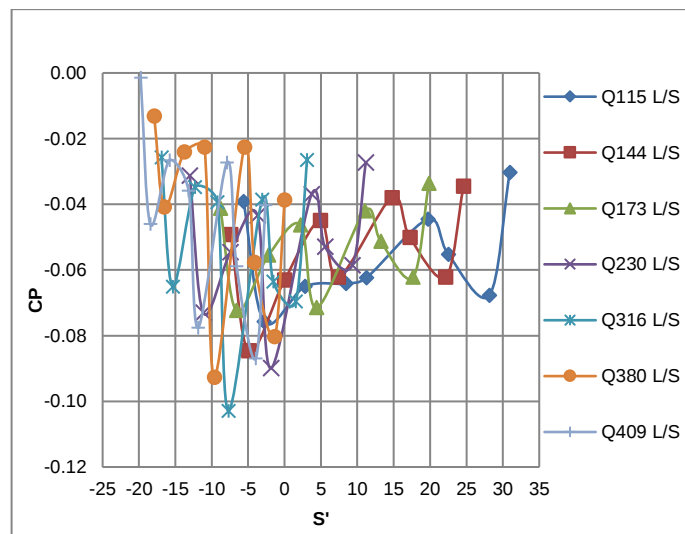


(b)

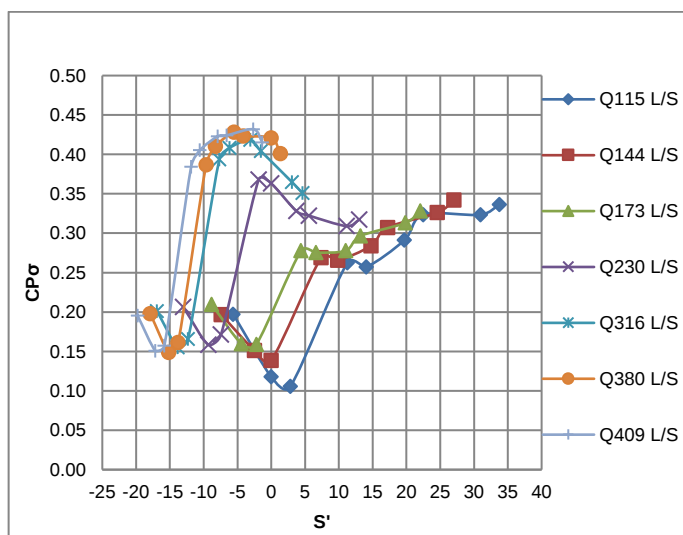
Apêndice D – Comportamento das cargas de pressão registradas no modelo LAHE (1:10), adimensionalizados por CP e S', para (a) Patamar e (b) Espelho.



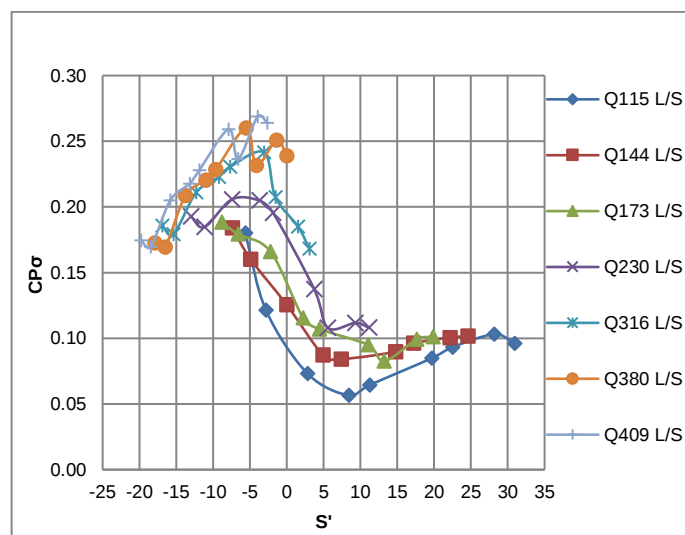
(a)



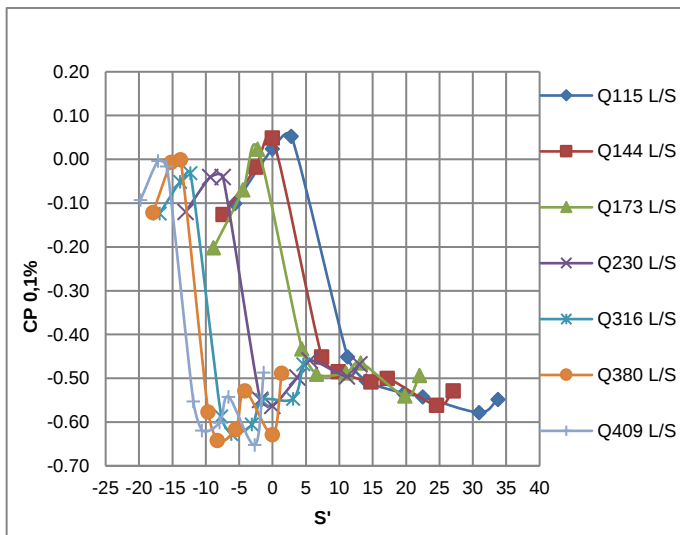
(b)



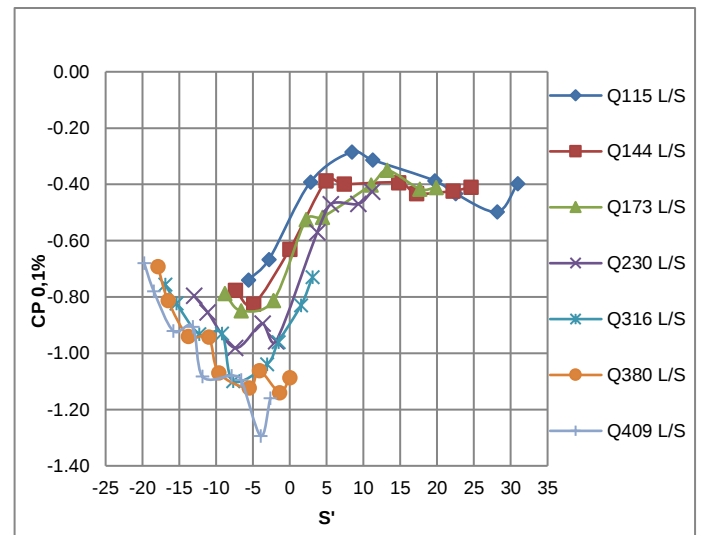
(a)



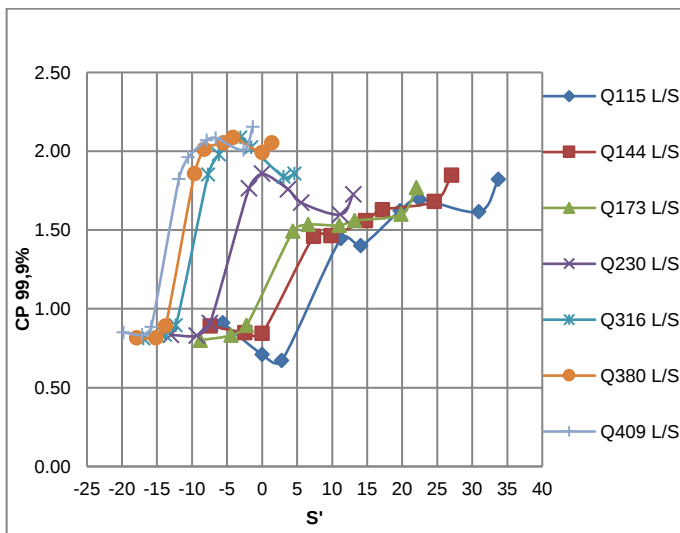
(b)



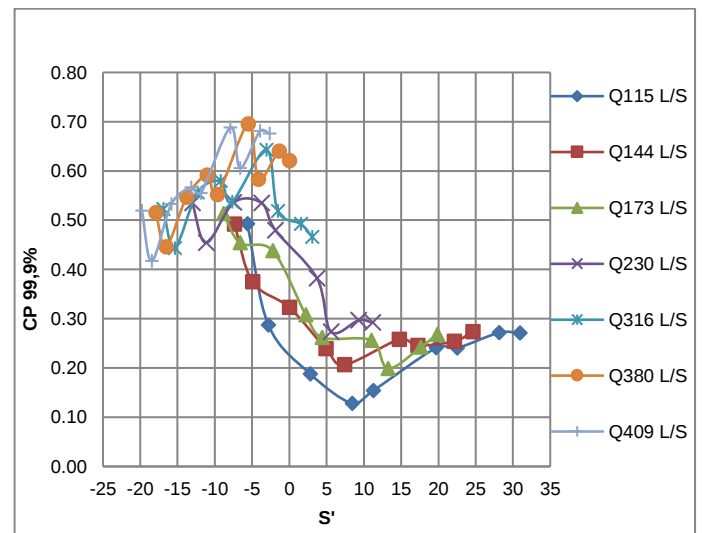
(a)



(b)

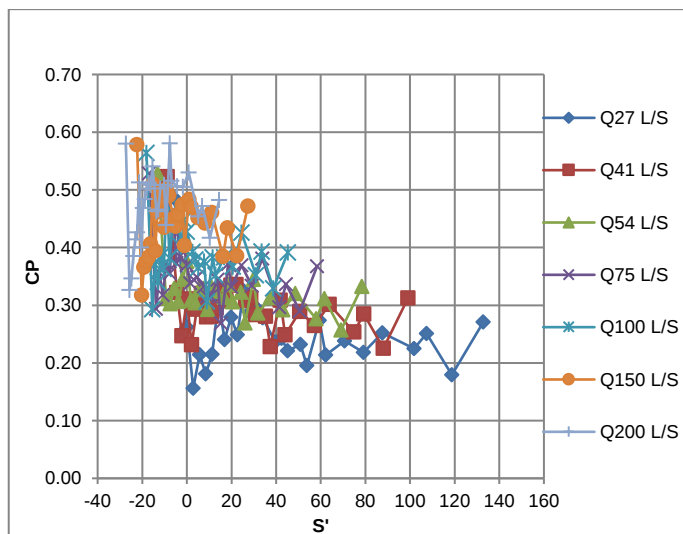


(a)

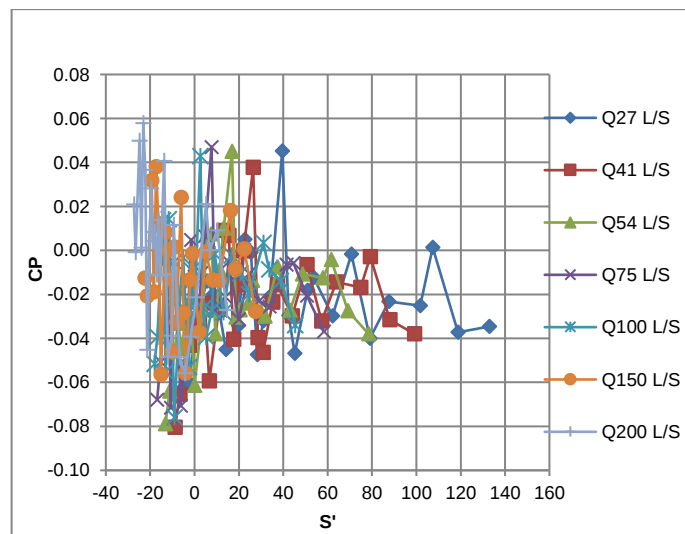


(b)

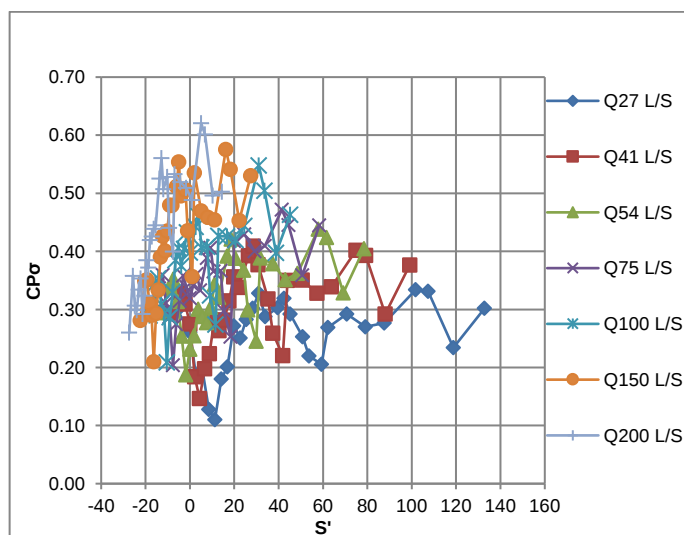
Apêndice E - Comportamento das cargas de pressão registradas no modelo LOH II (1:15), adimensionalizados por C_p e S' , para (a) Patamar e (b) Espelho.



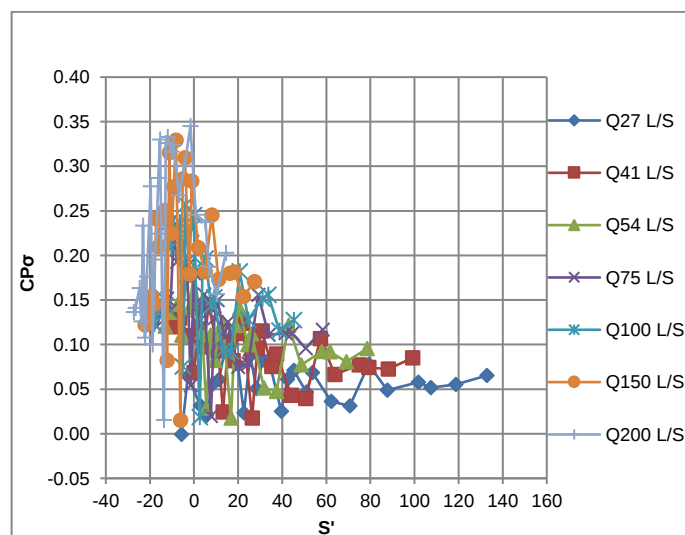
(a)



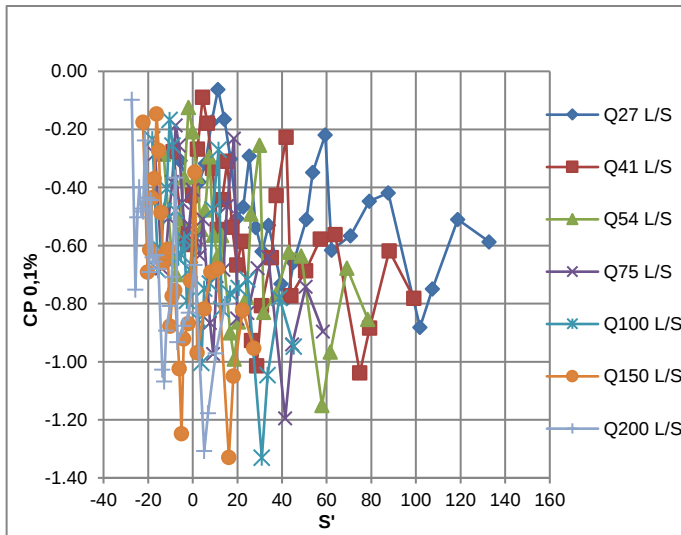
(b)



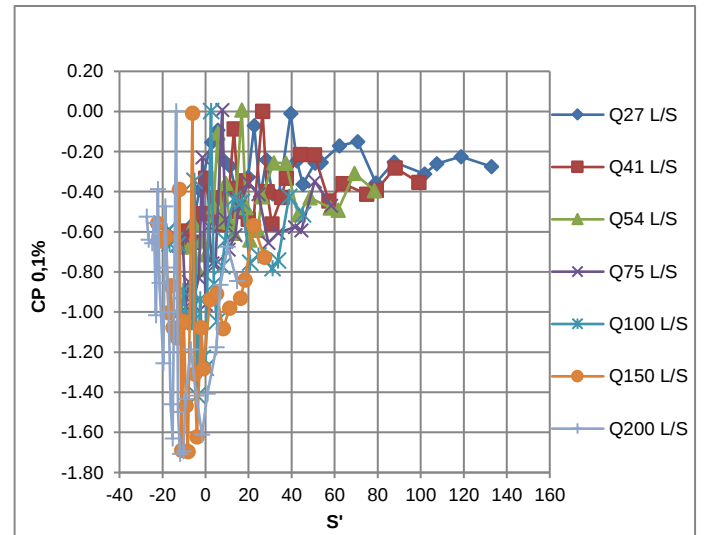
(a)



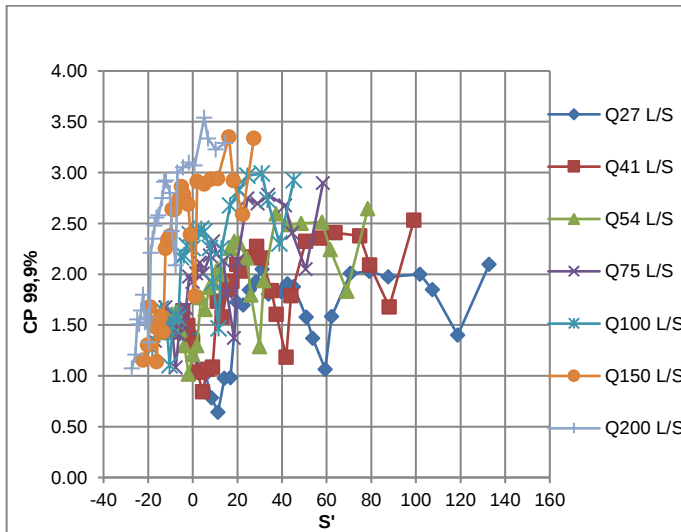
(b)



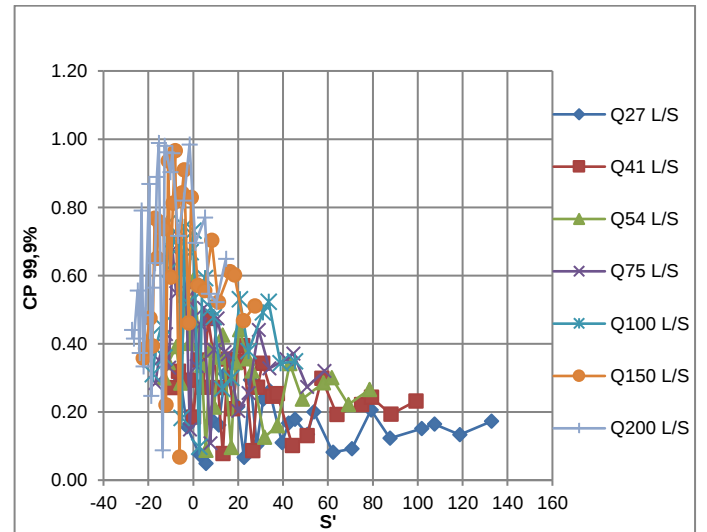
(a)



(b)

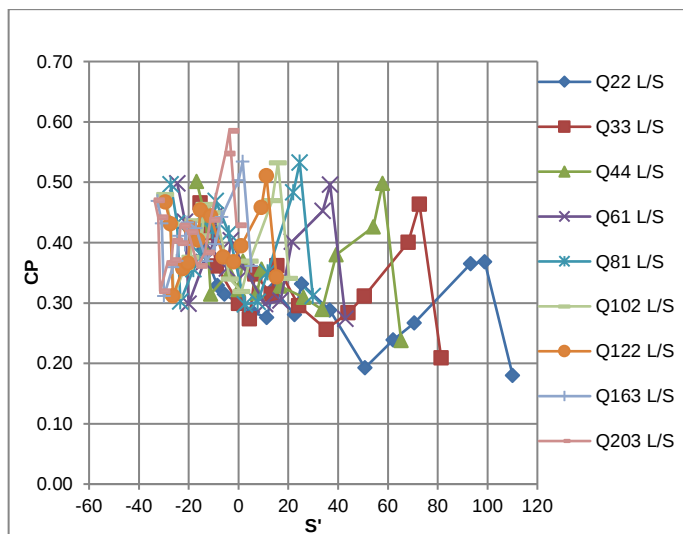


(a)

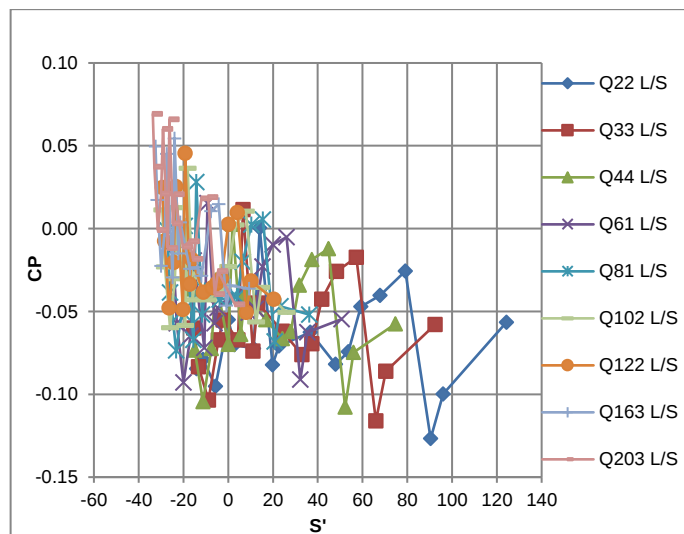


(b)

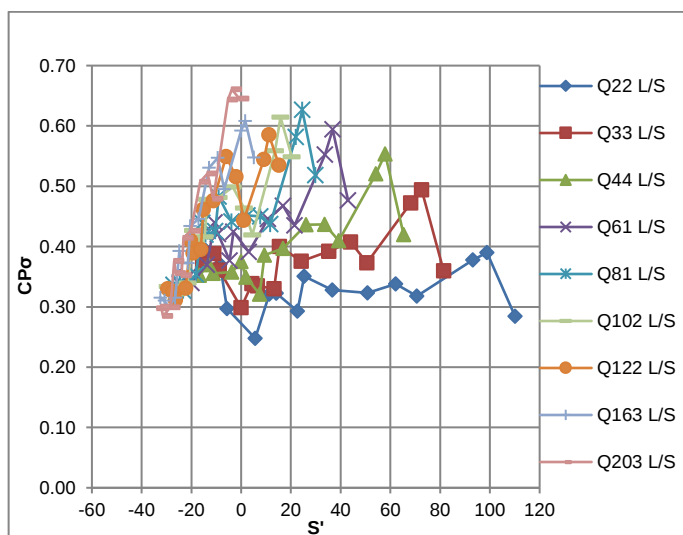
Apêndice F – Comportamento das cargas de pressão registradas no modelo LAHE II (1:30), adimensionalizados por CP e S', para (a) Patamar e (b) Espelho.



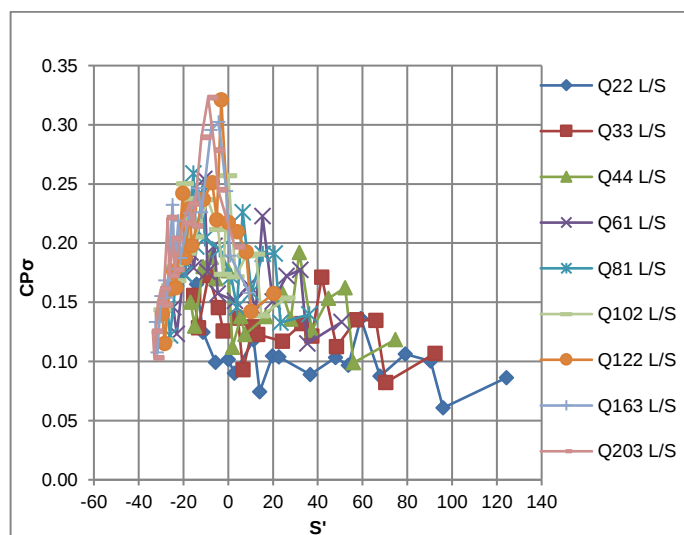
(a)



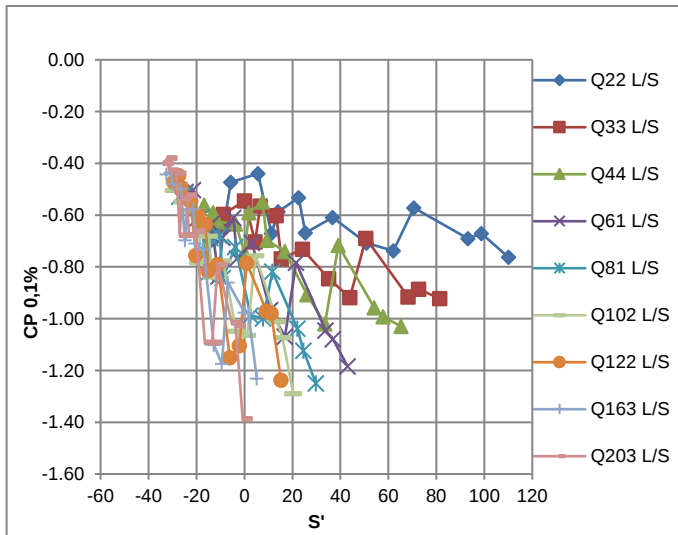
(b)



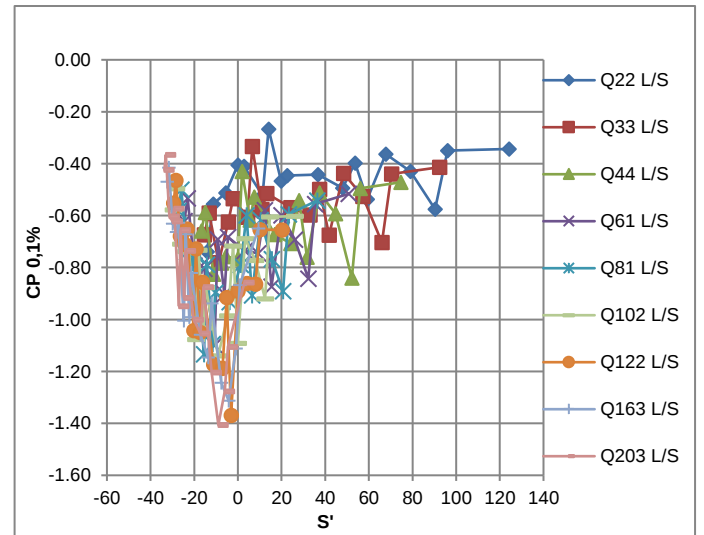
(a)



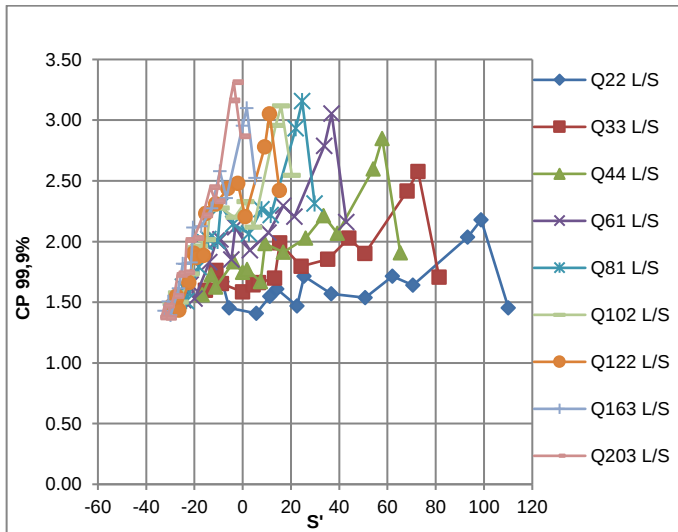
(b)



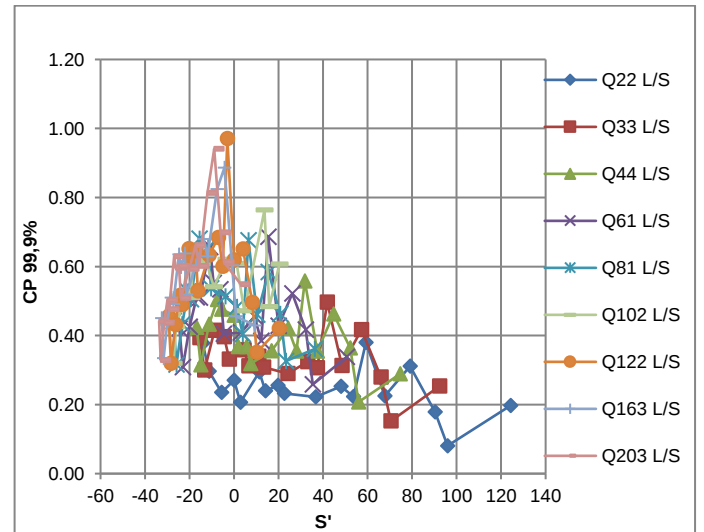
(a)



(b)

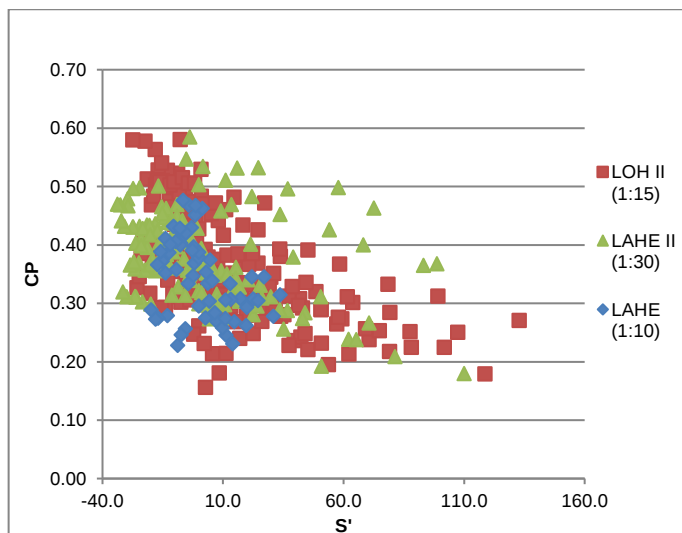


(a)

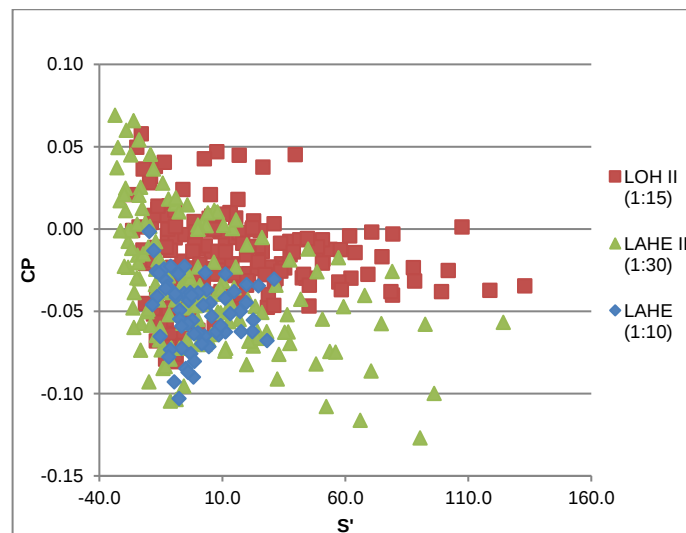


(b)

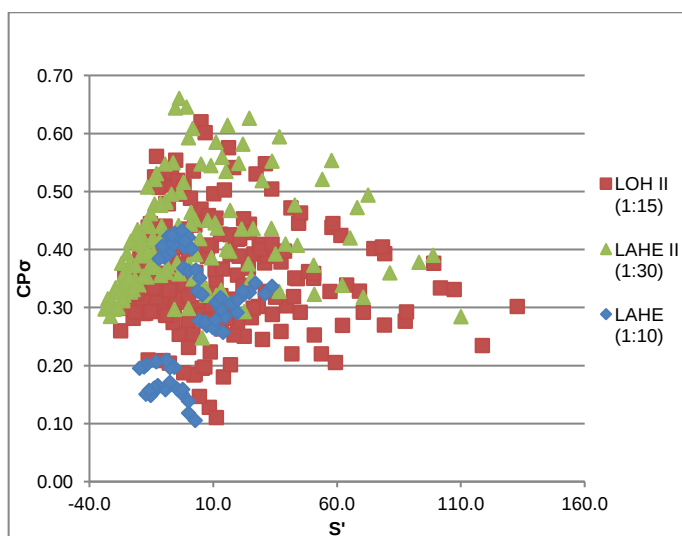
Apêndice G – Comportamento das cargas de pressão, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas por CP e S', para (a) Patamar e (b) Espelho.



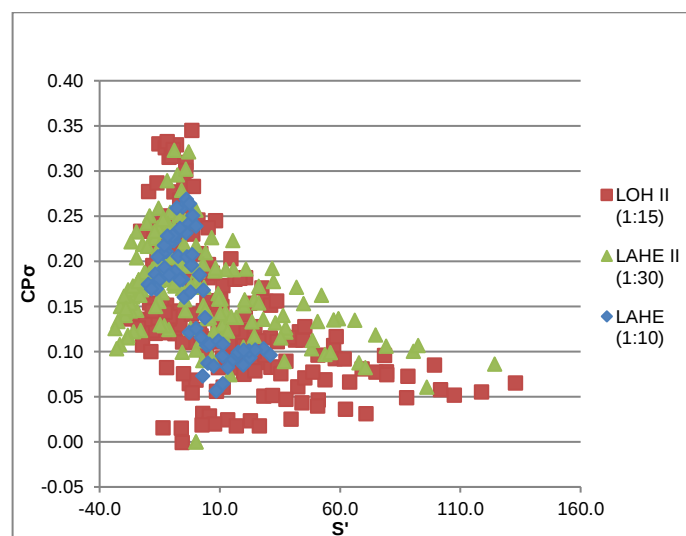
(a)



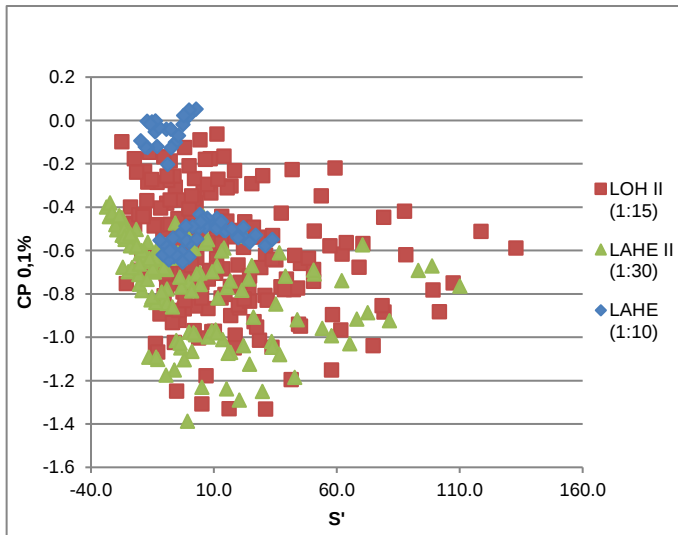
(b)



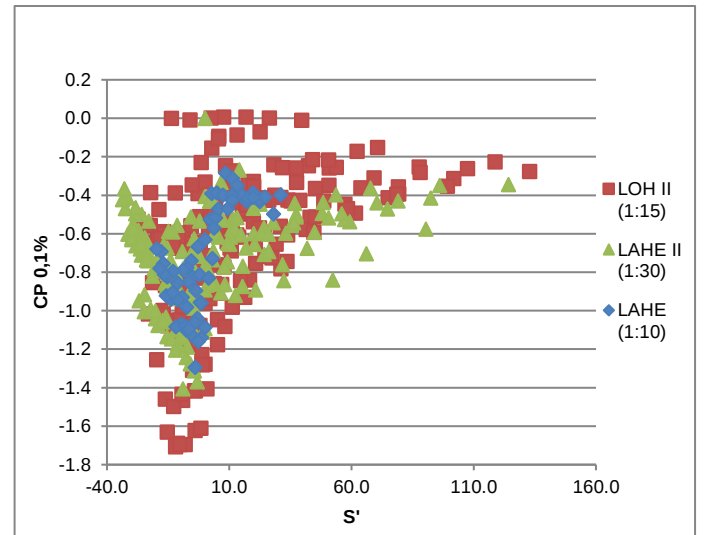
(a)



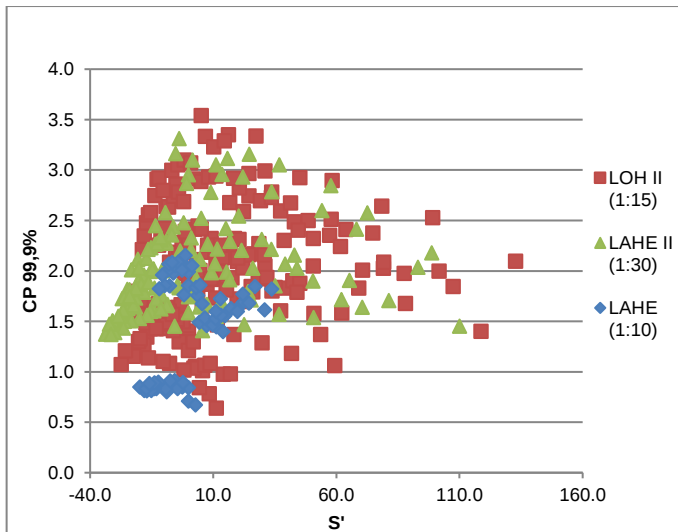
(b)



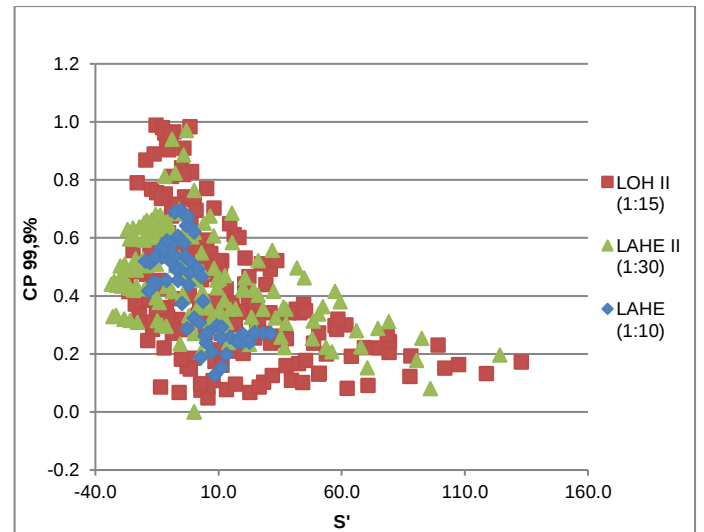
(a)



(b)

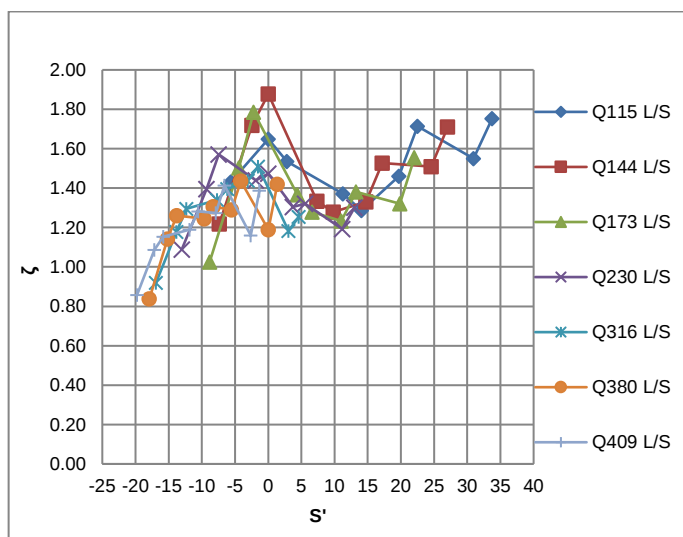


(a)

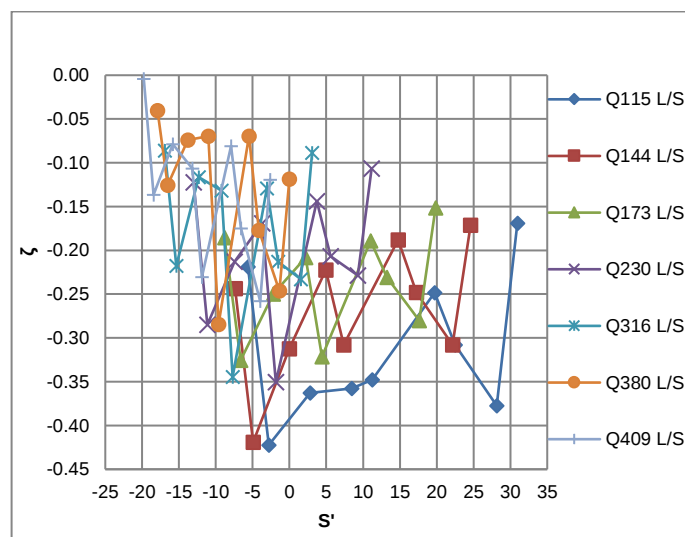


(b)

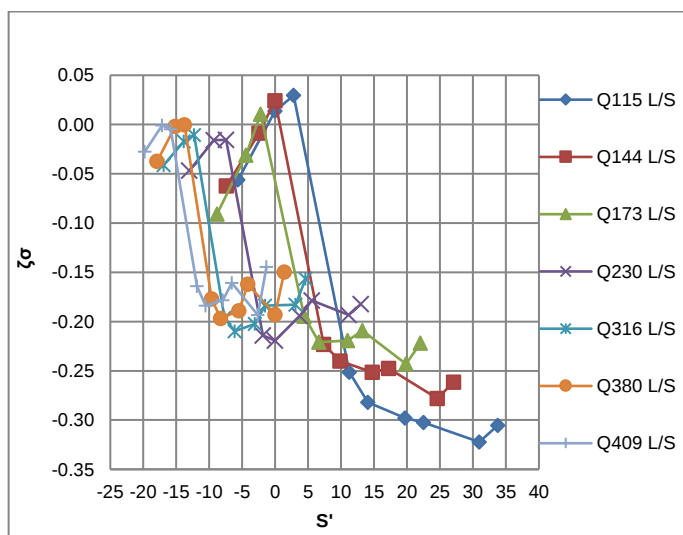
Apêndice H – Comportamento das cargas de pressão registradas no modelo LAHE (1:10), adimensionalizados por ζ e S' , para (a) Patamar e (b) Espelho.



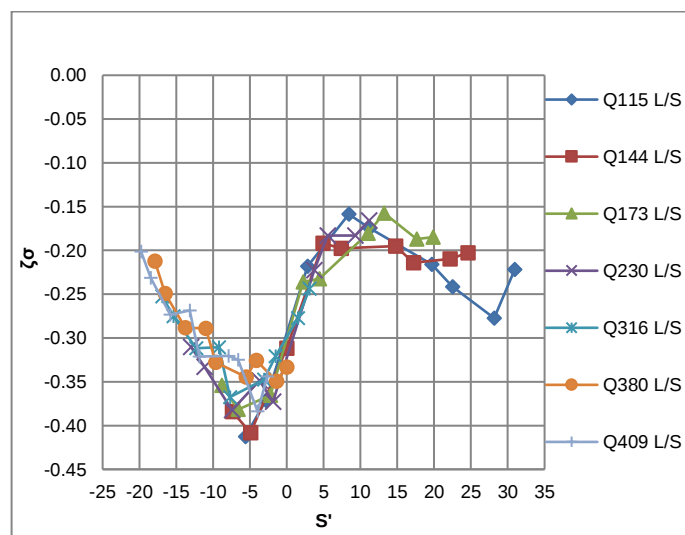
(a)



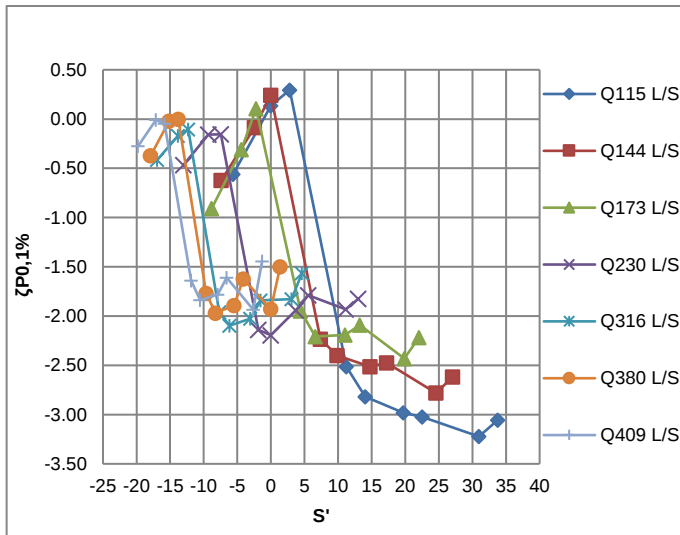
(b)



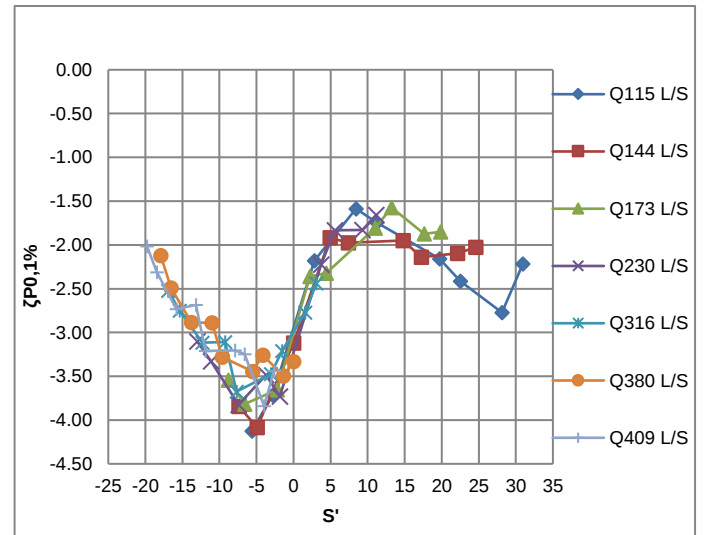
(a)



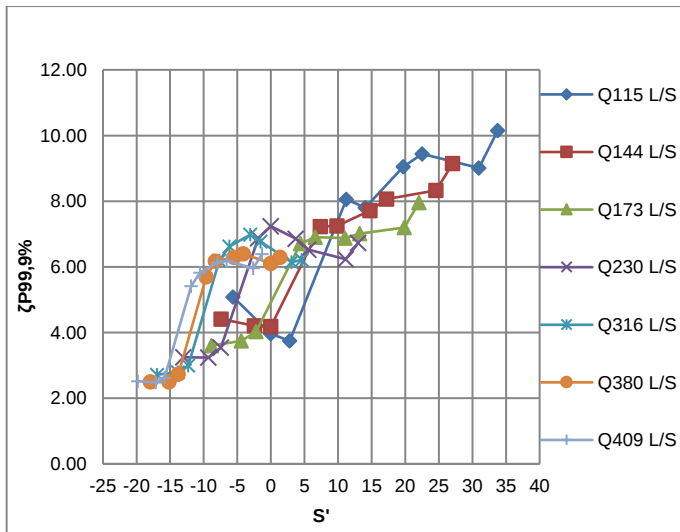
(b)



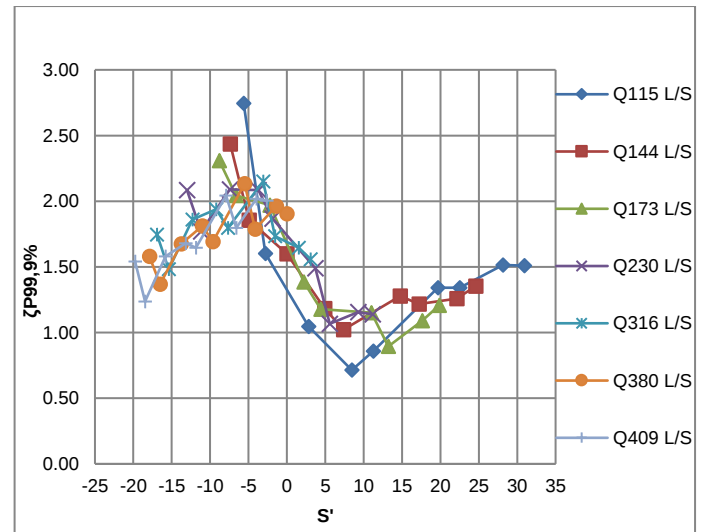
(a)



(b)

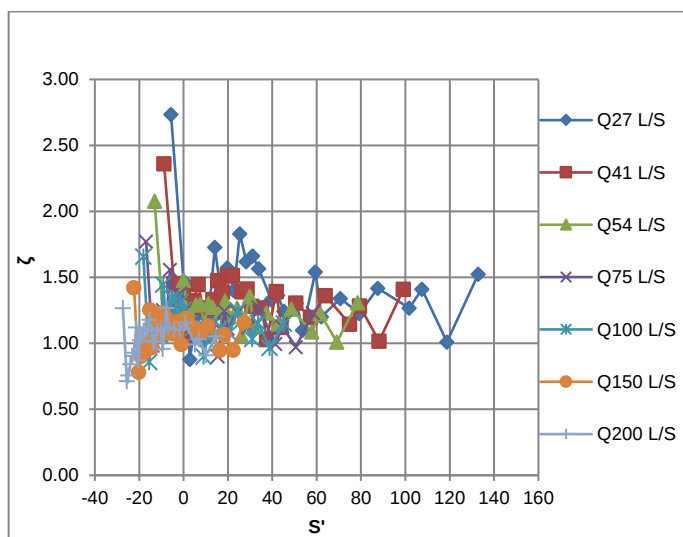


(a)

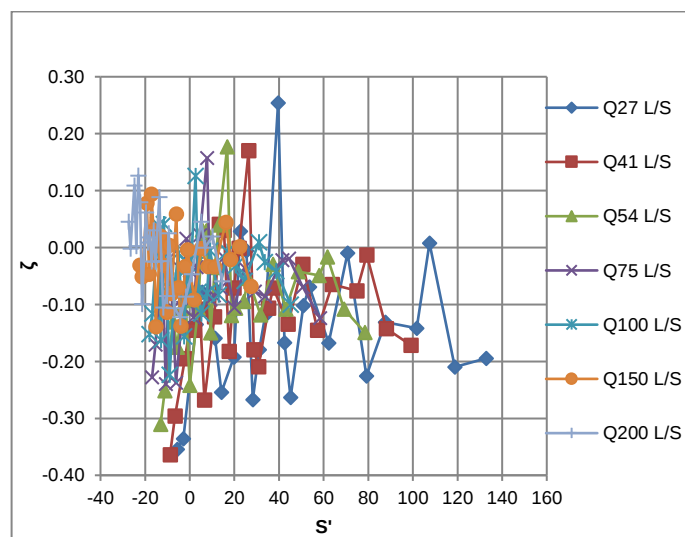


(b)

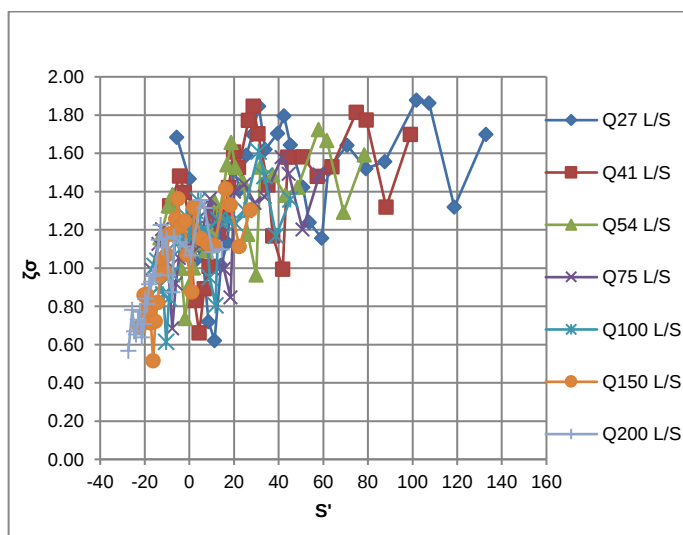
Apêndice I – Comportamento das cargas de pressão registradas no modelo LOH II (1:15), adimensionalizados por ζ e S' , para (a) Patamar e (b) Espelho.



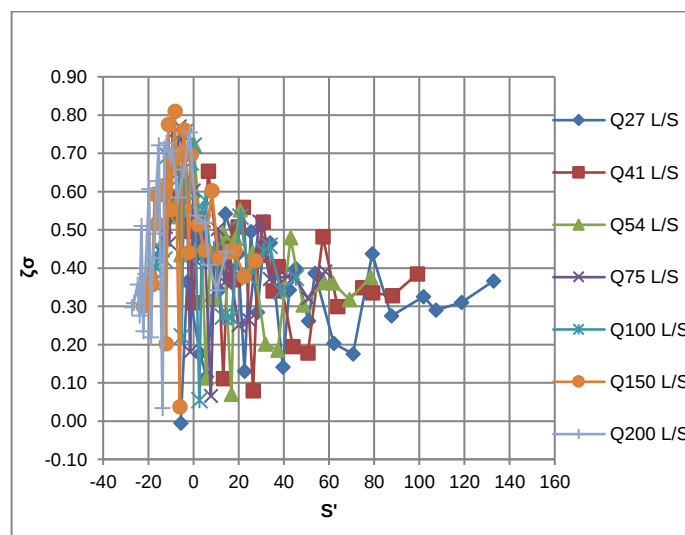
(a)



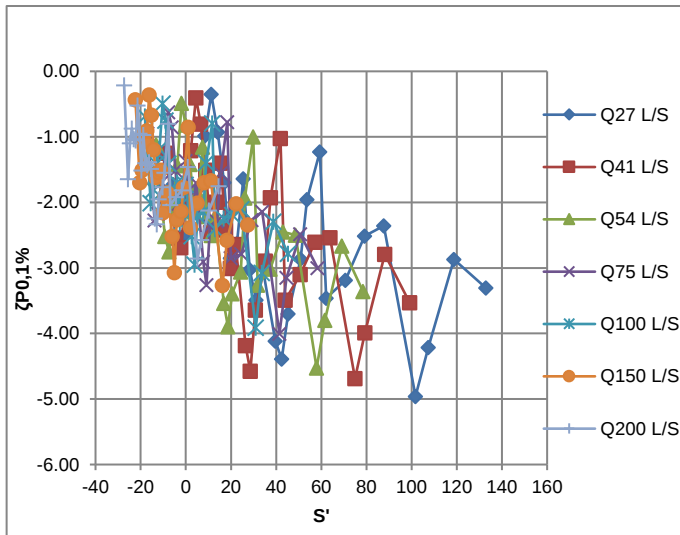
(b)



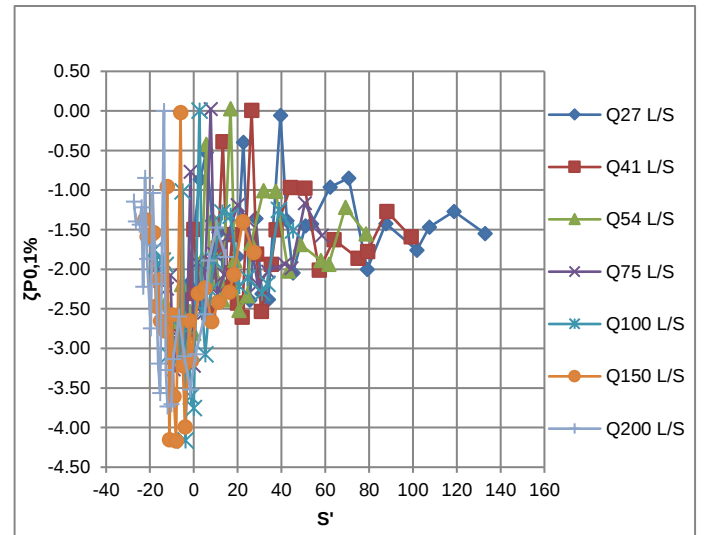
(a)



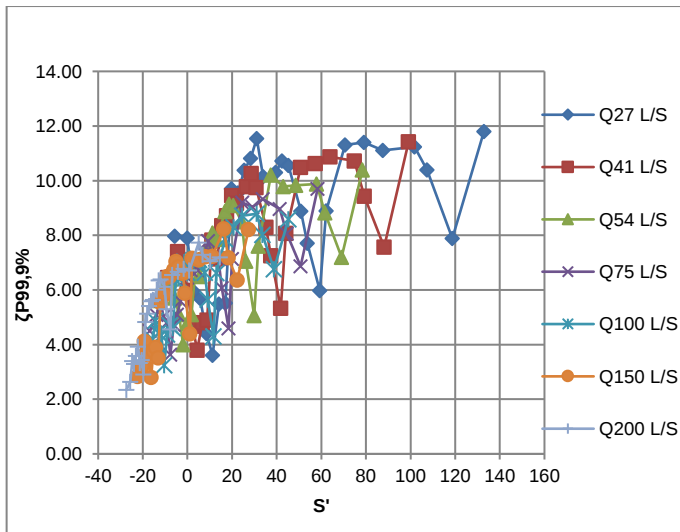
(b)



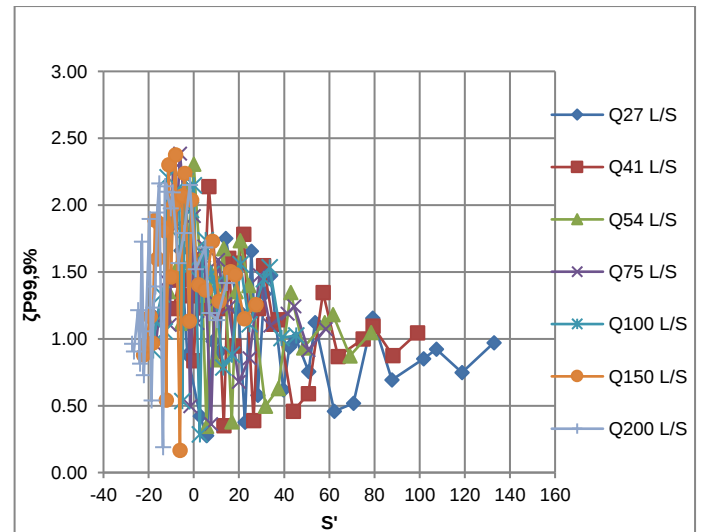
(a)



(b)

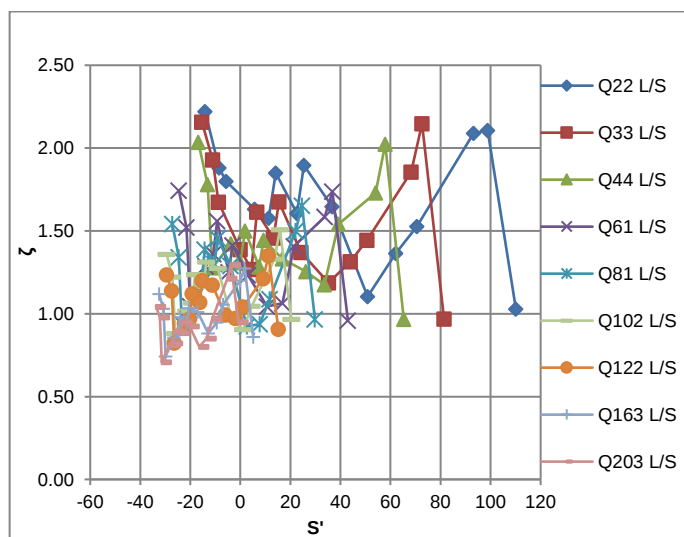


(a)

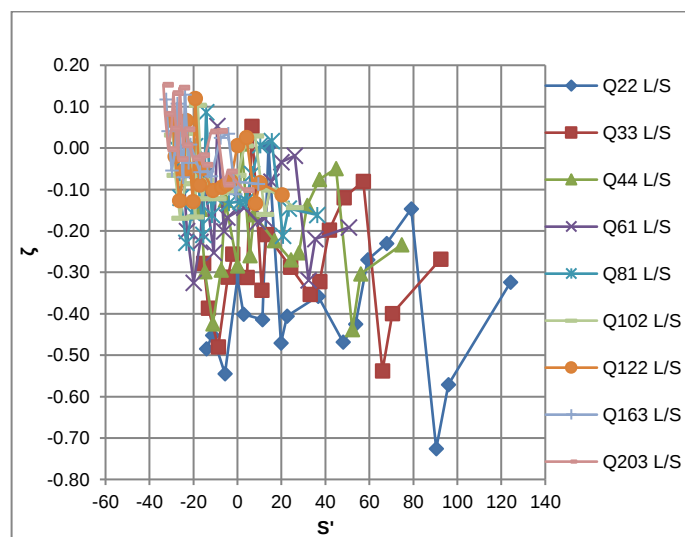


(b)

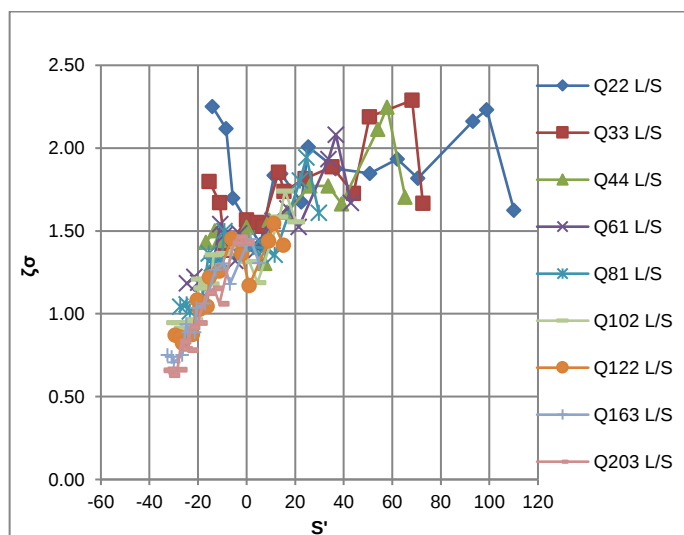
Apêndice J– Comportamento das cargas de pressão registradas no modelo LAHE II (1:30), adimensionalizados por ζ e S' , para (a) Patamar e (b) Espelho.



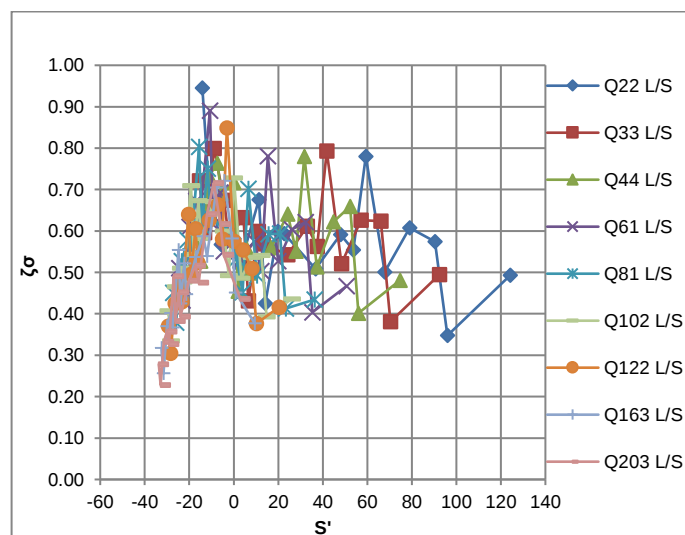
(a)



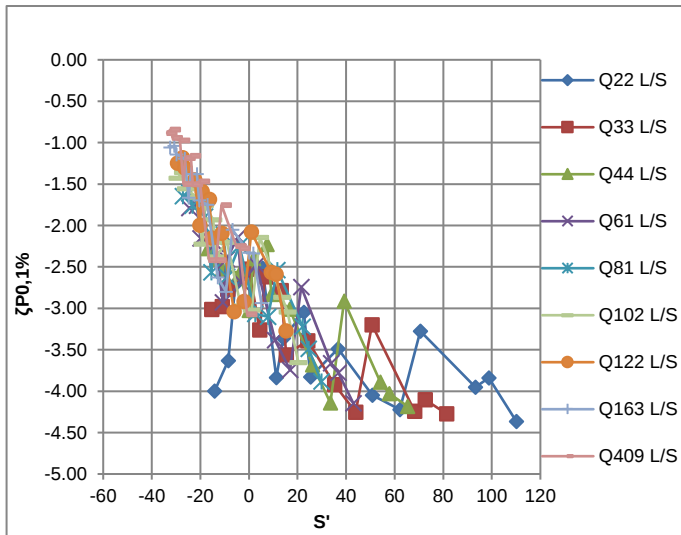
(b)



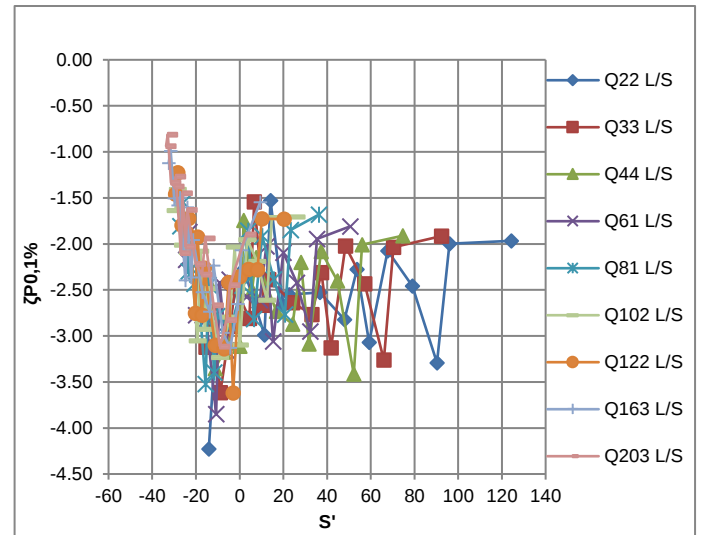
(a)



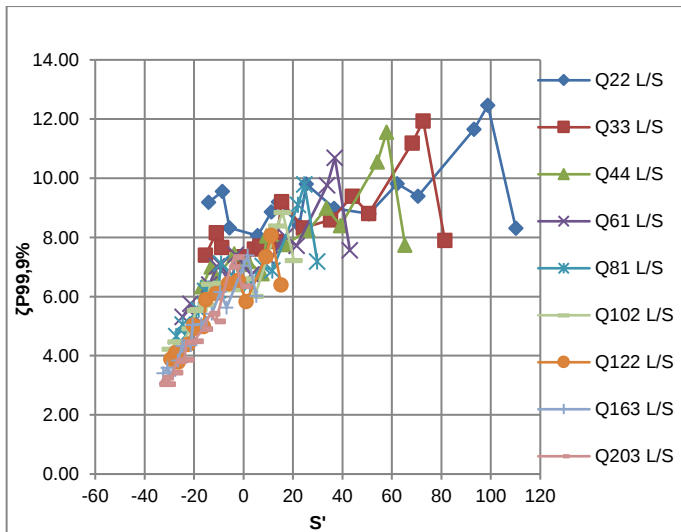
(b)



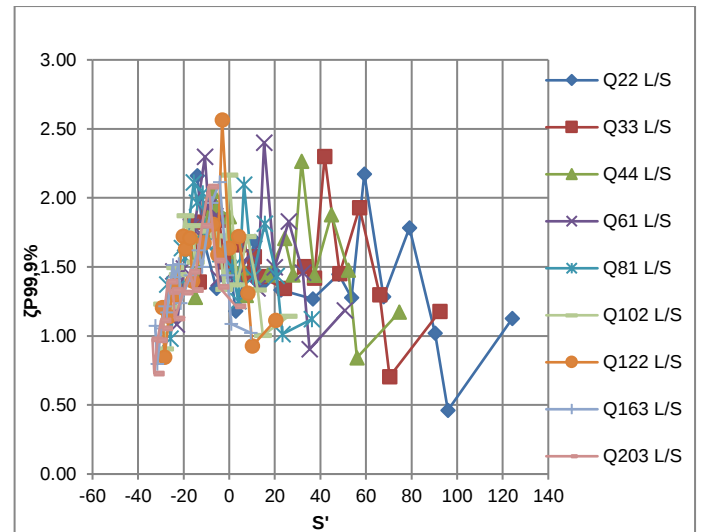
(a)



(b)

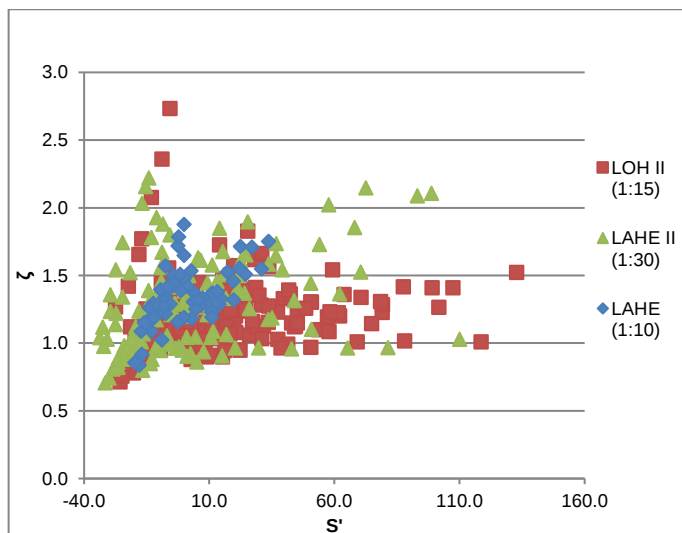


(a)

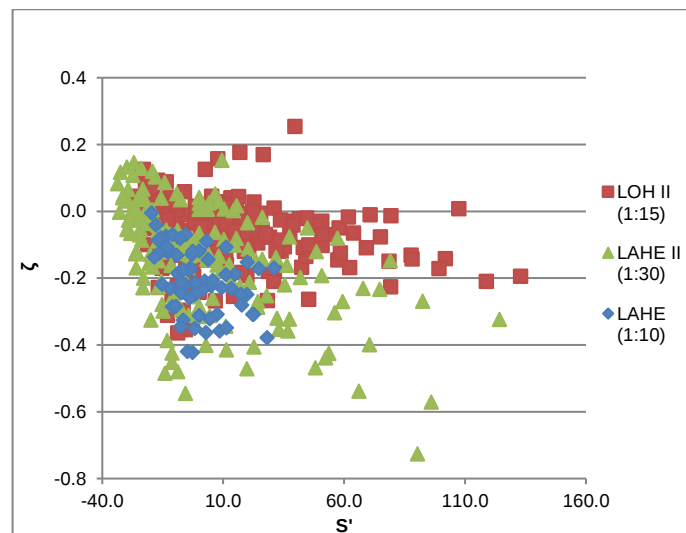


(b)

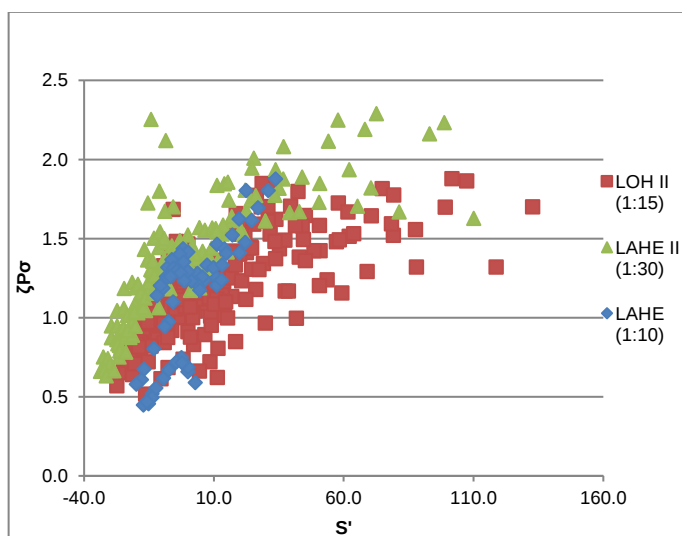
Apêndice K – Comportamento das cargas de pressão, dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II, adimensionalizadas por ζ e S' , para (a) Patamar e (b) Espelho.



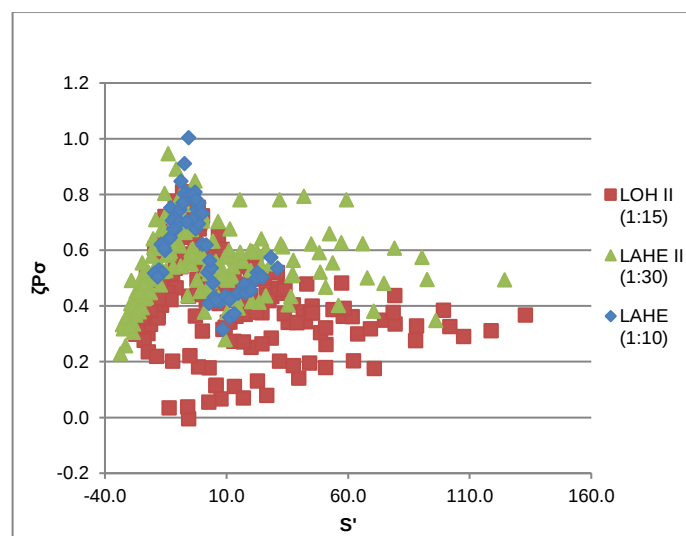
(a)



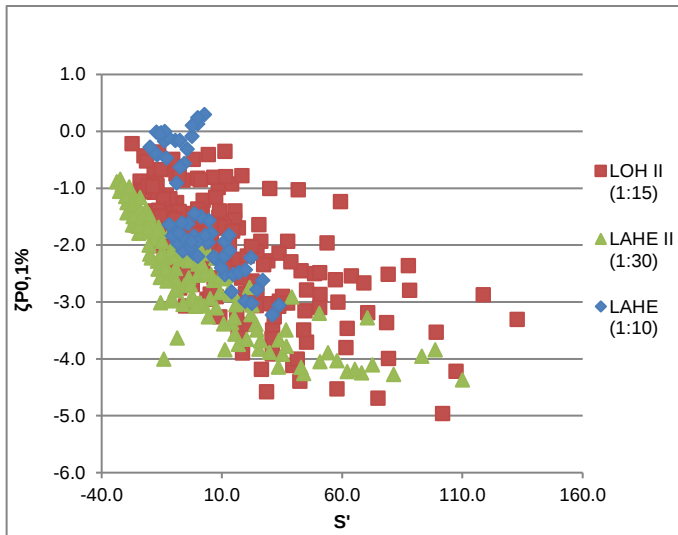
(b)



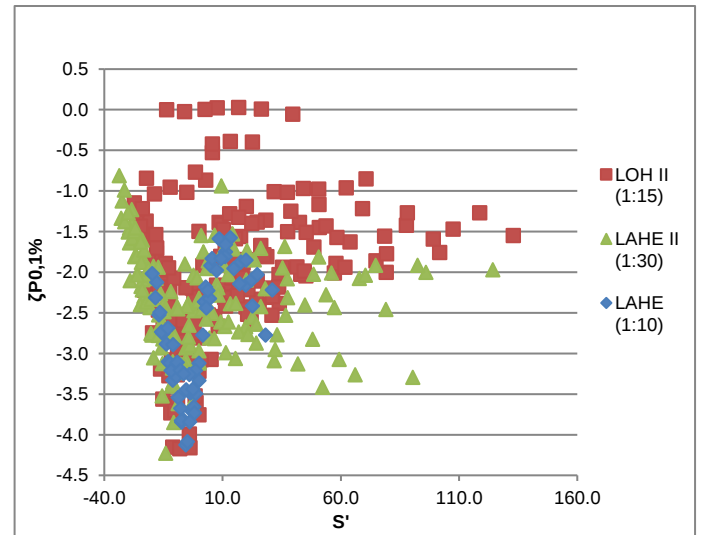
(a)



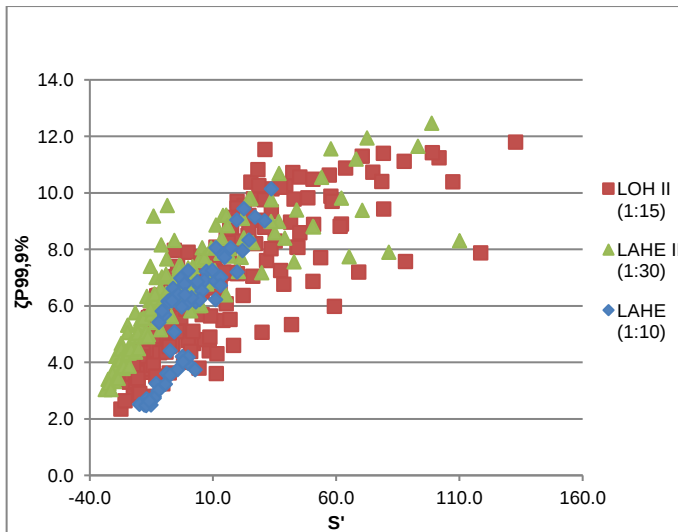
(b)



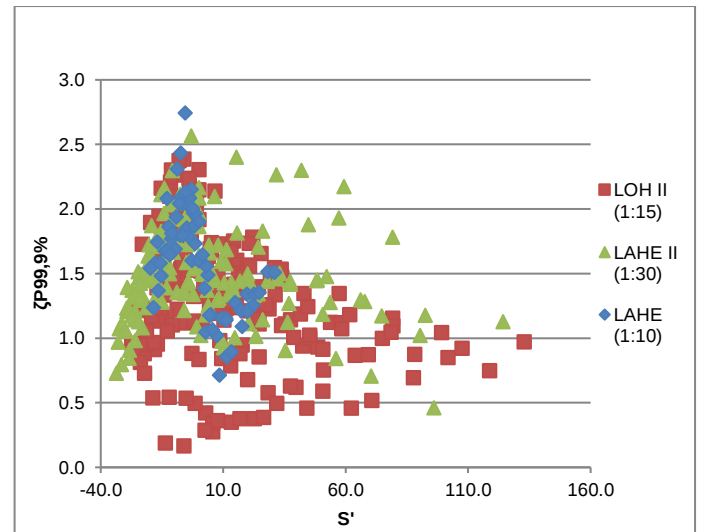
(a)



(b)

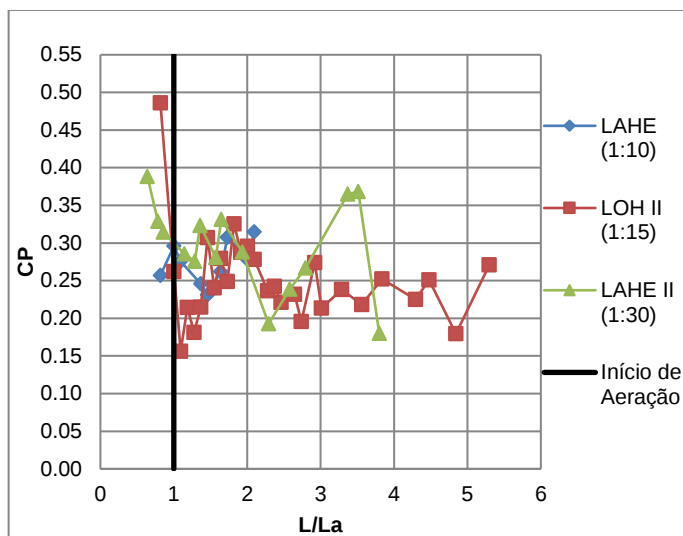


(a)

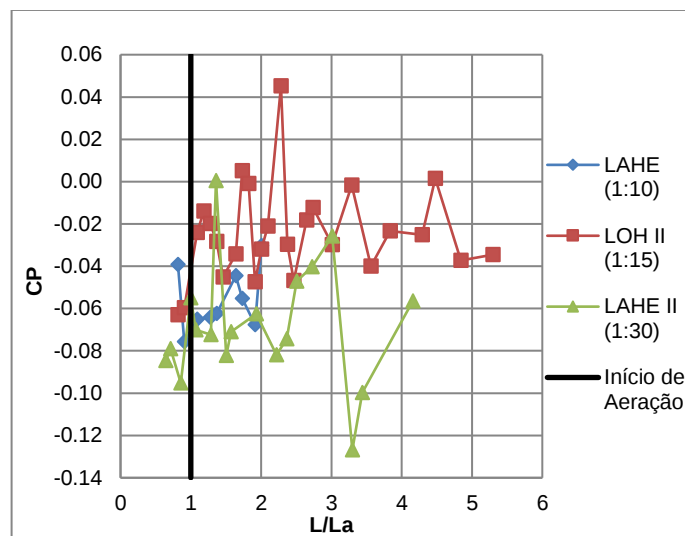


(b)

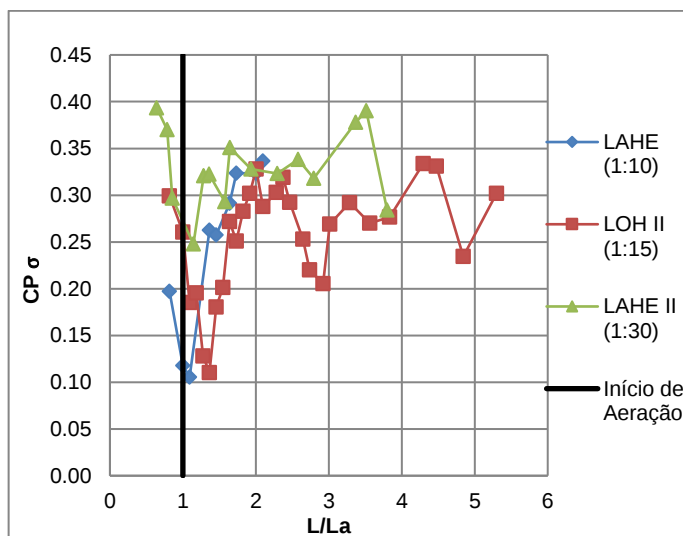
Apêndice L - Comparação do comportamento das cargas de pressão adimensionalizadas por CP e L/L_a , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.



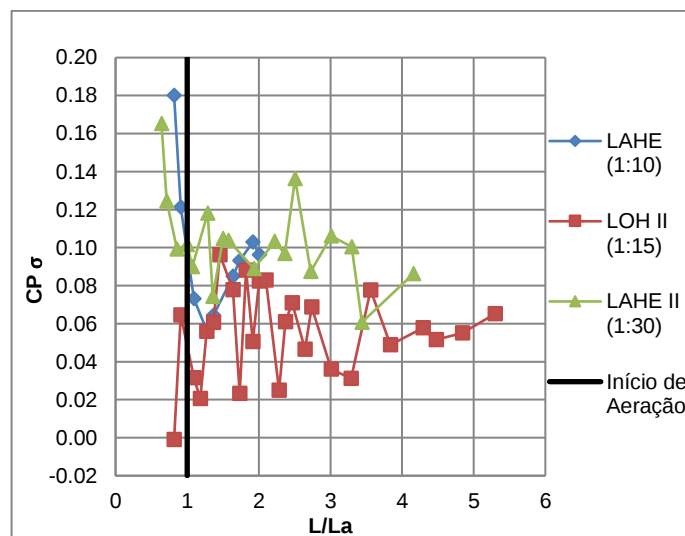
(a)



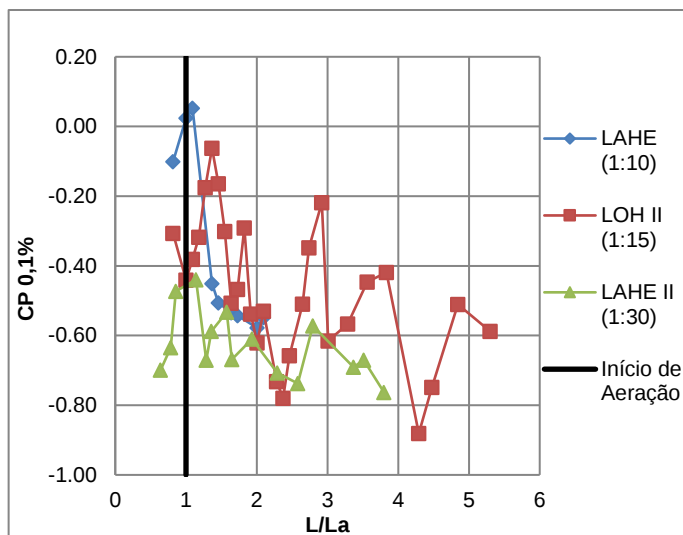
(b)



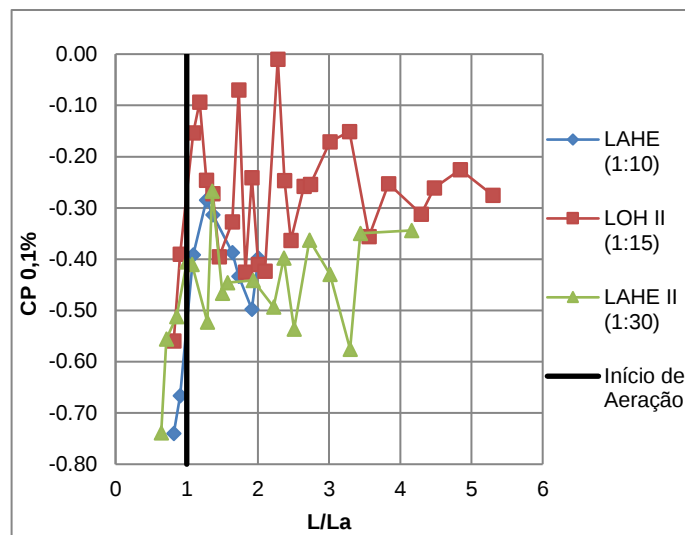
(a)



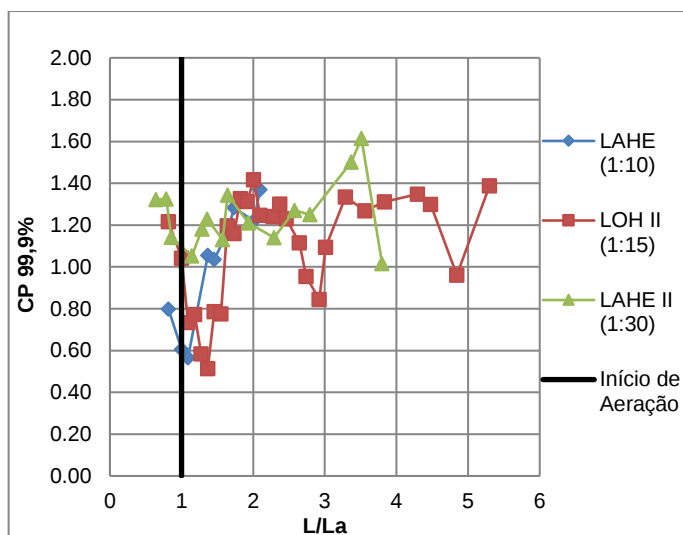
(b)



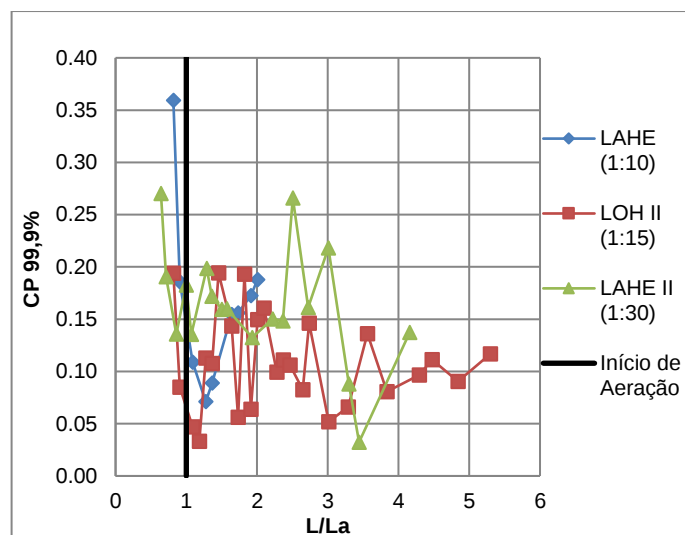
(a)



(b)

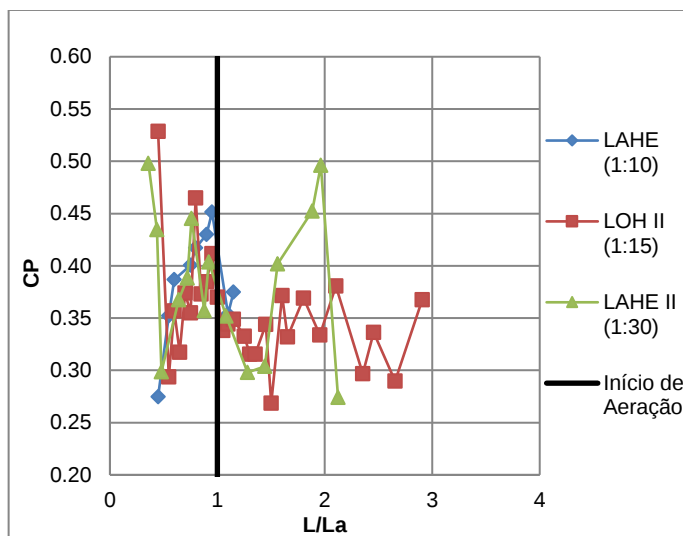


(a)

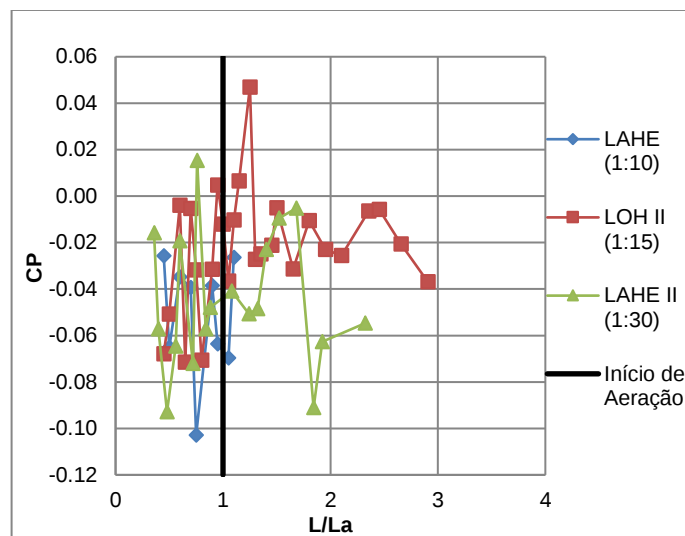


(b)

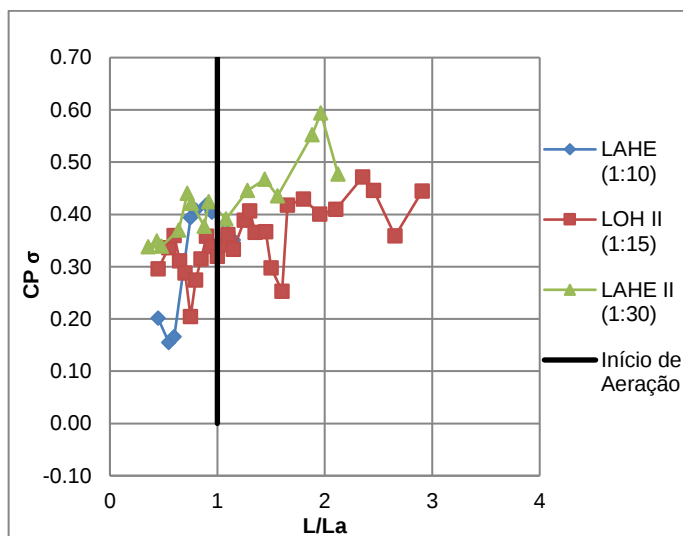
Apêndice M - Comparação do comportamento das cargas de pressão adimensionalizadas por CP e L/L_a , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.



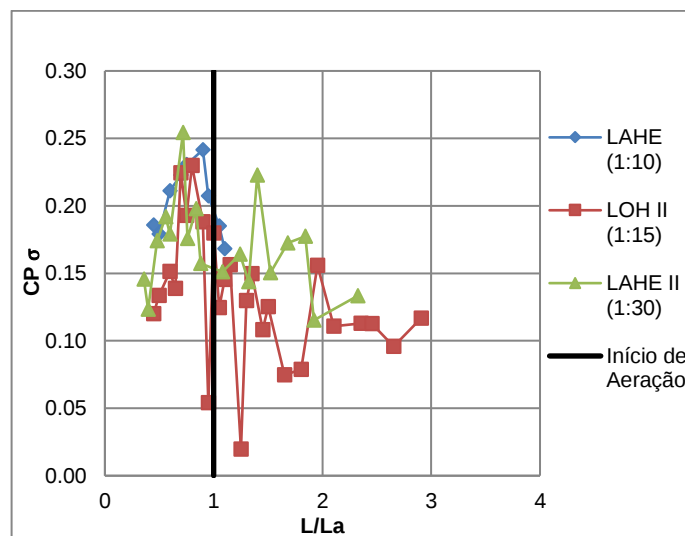
(a)



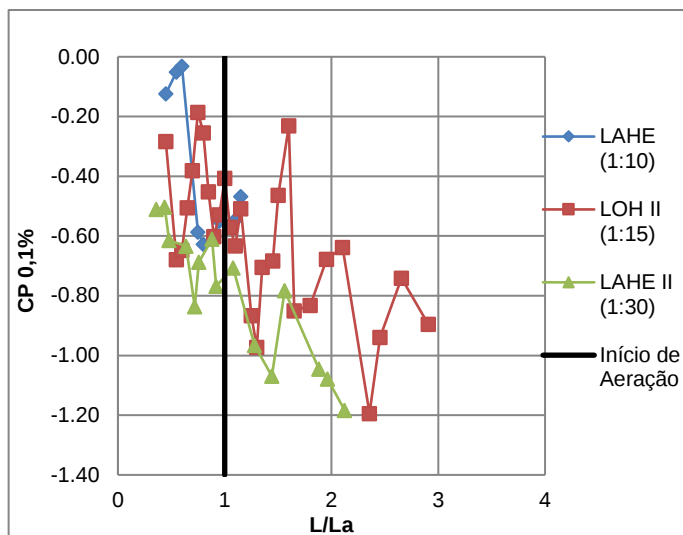
(b)



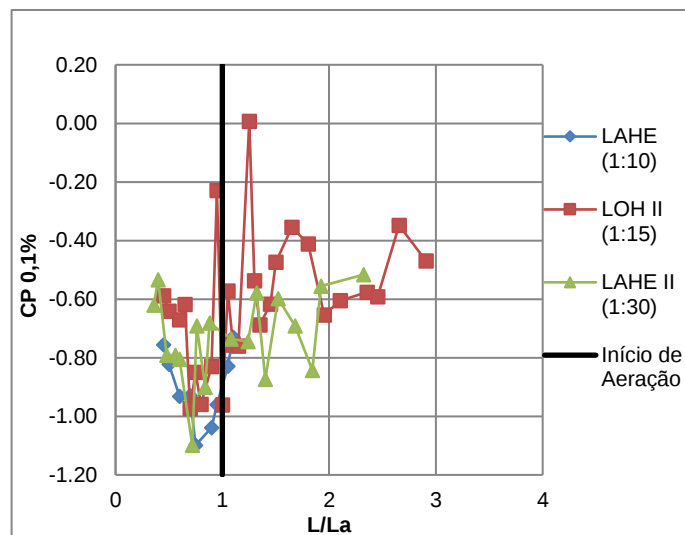
(a)



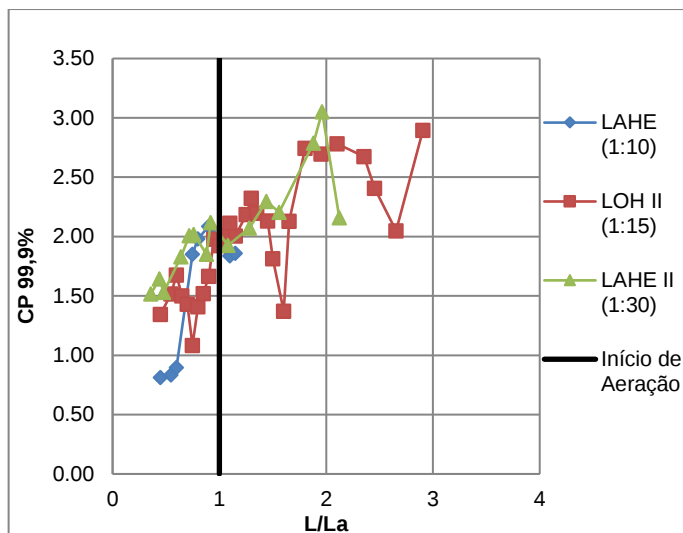
(b)



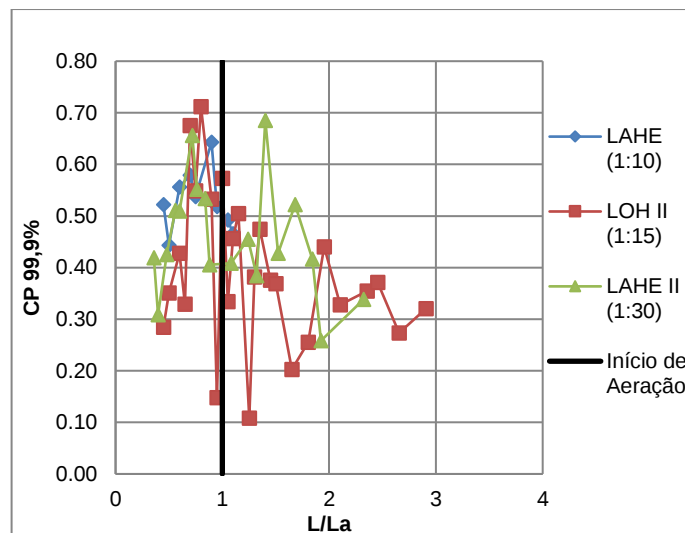
(a)



(b)

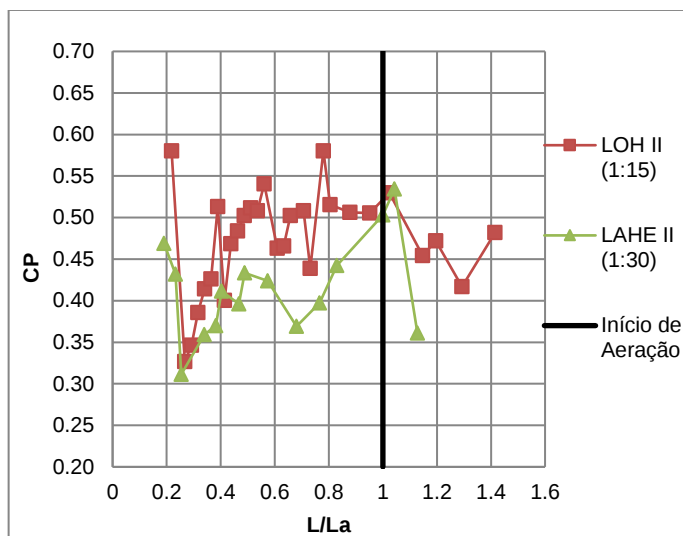


(a)

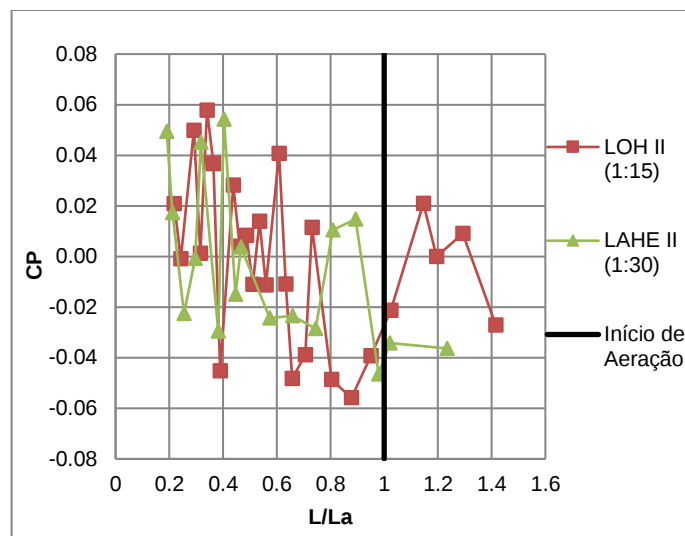


(b)

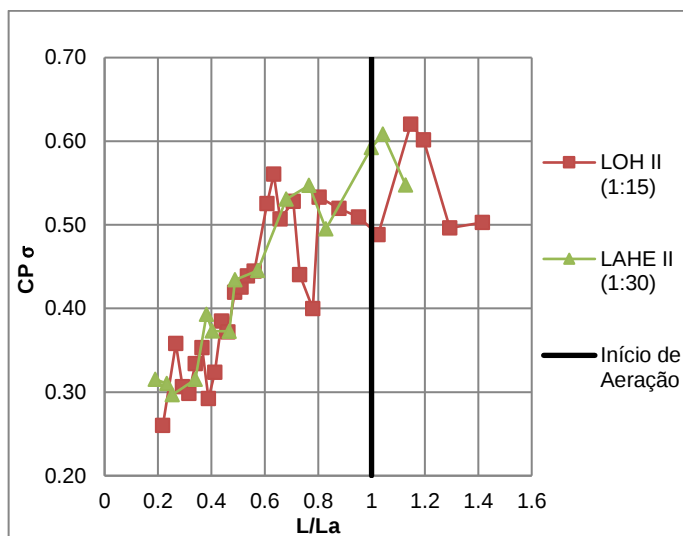
Apêndice N - Comparação do comportamento das cargas de pressão adimensionalizadas por CP e L/L_a , para os modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$, para (a) Patamar e (b) Espelho.



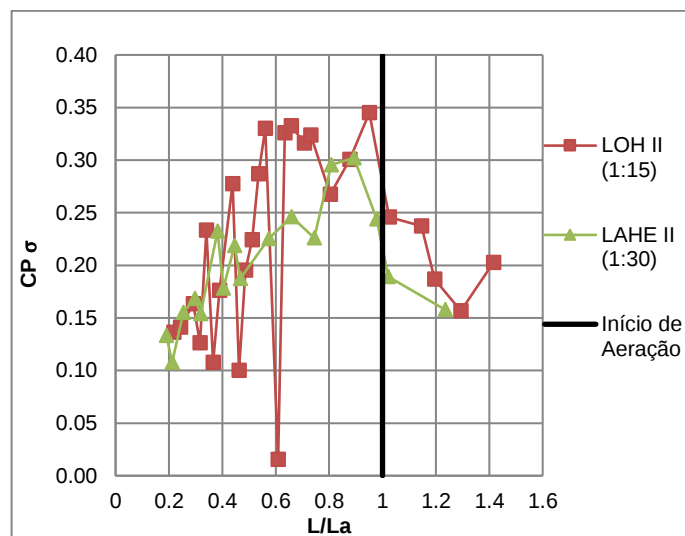
(a)



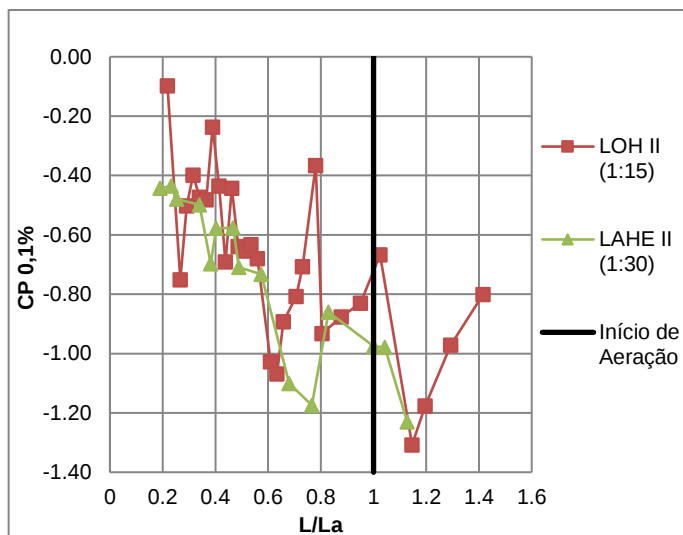
(b)



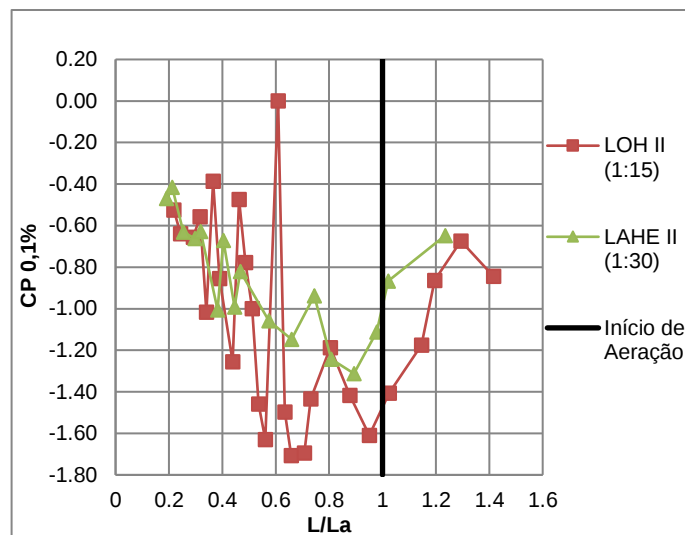
(a)



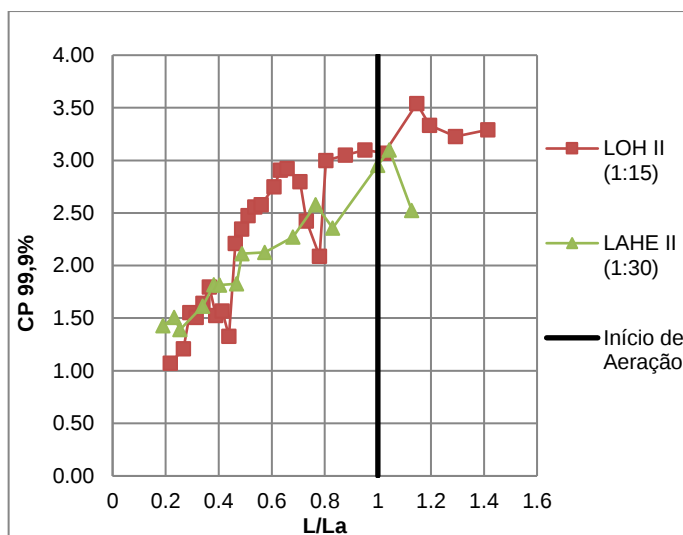
(b)



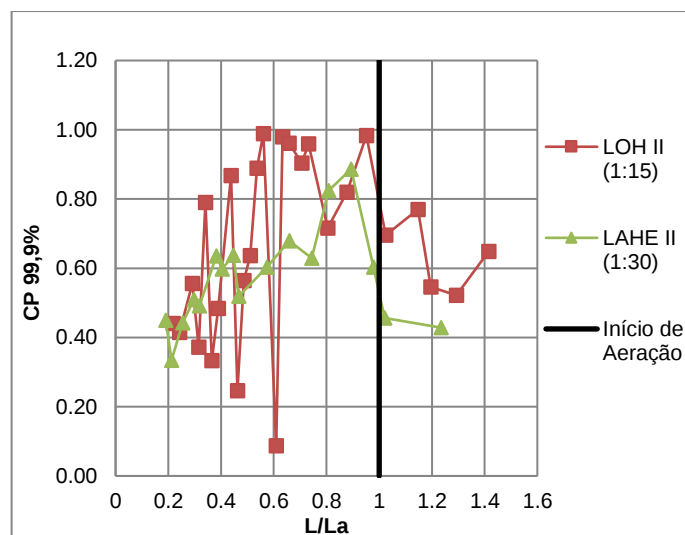
(a)



(b)

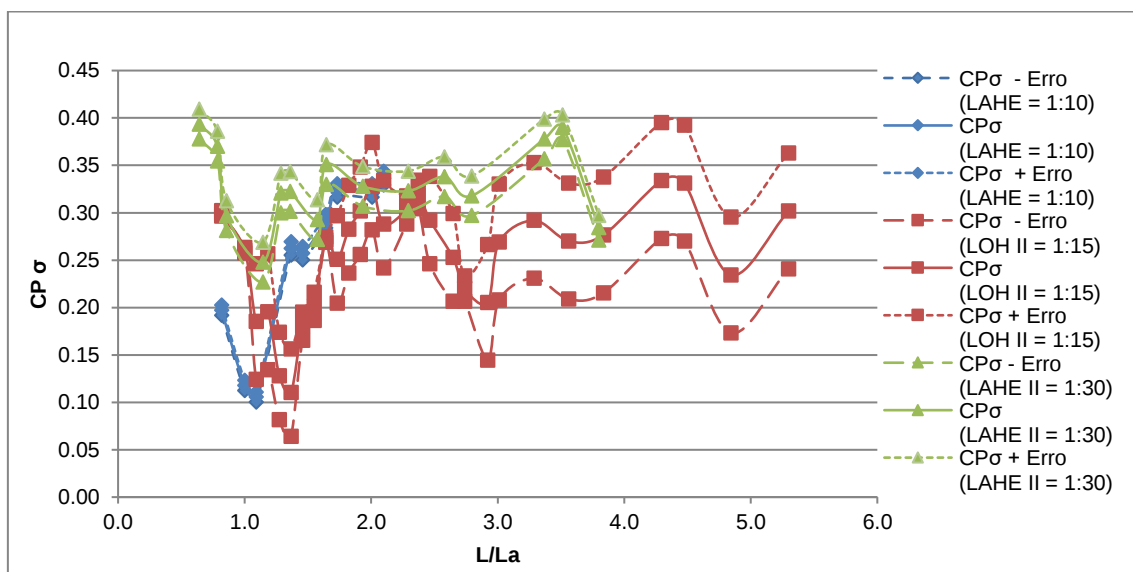
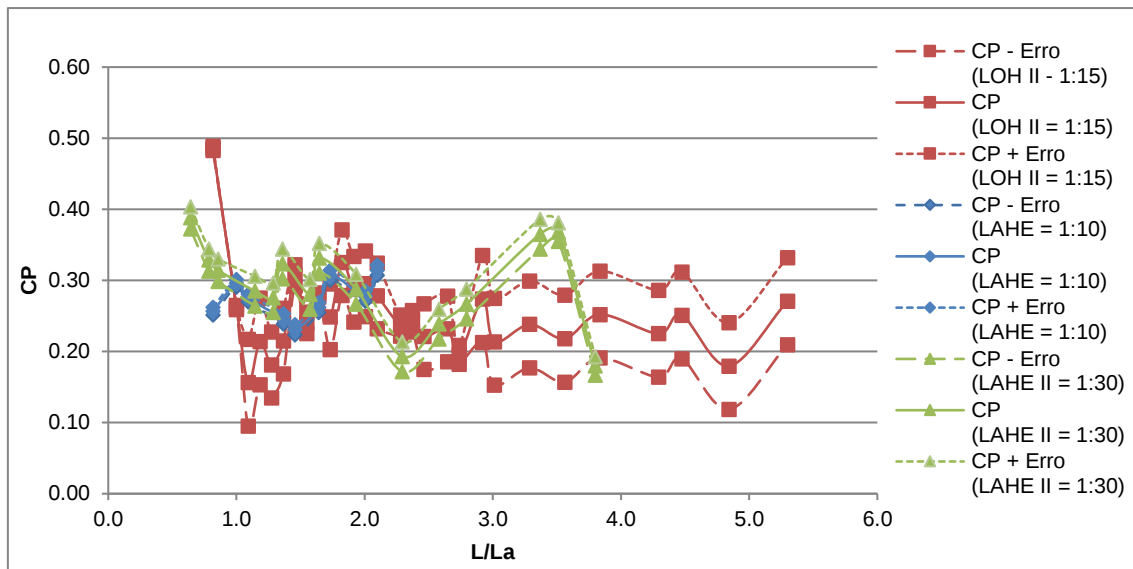


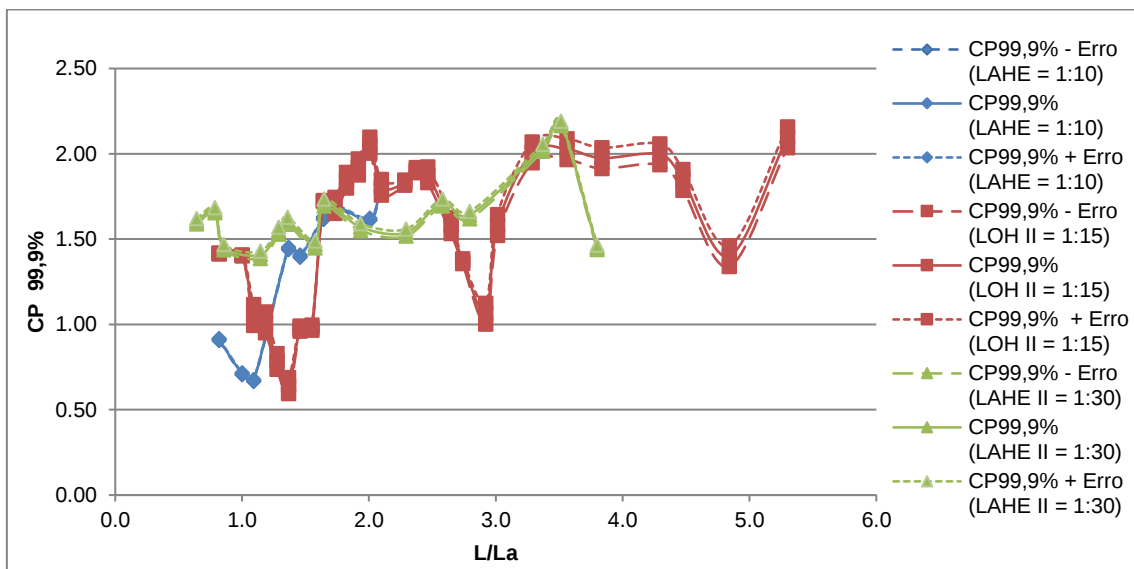
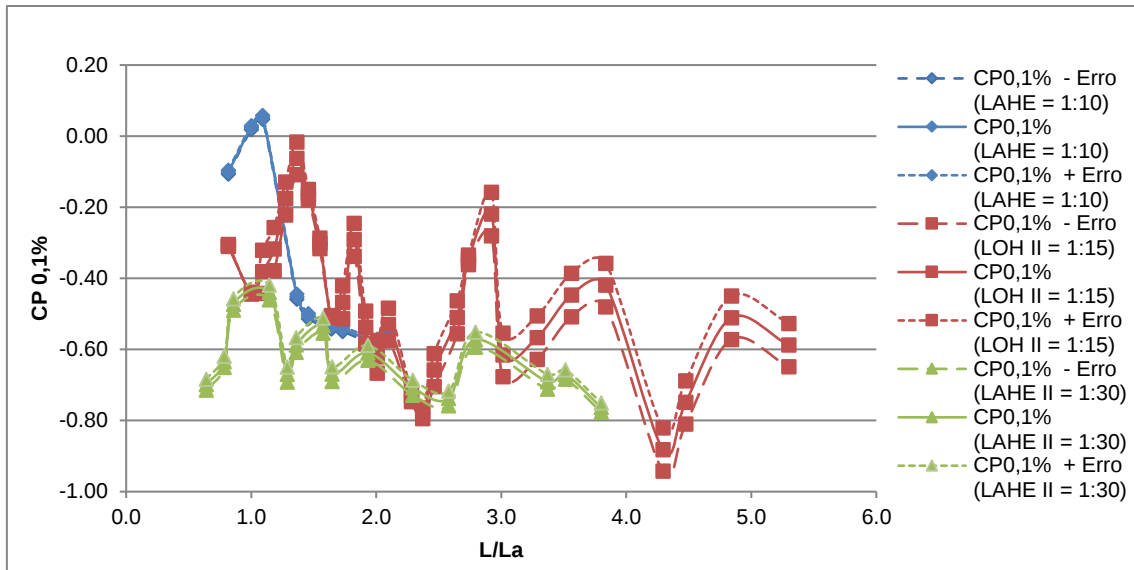
(a)



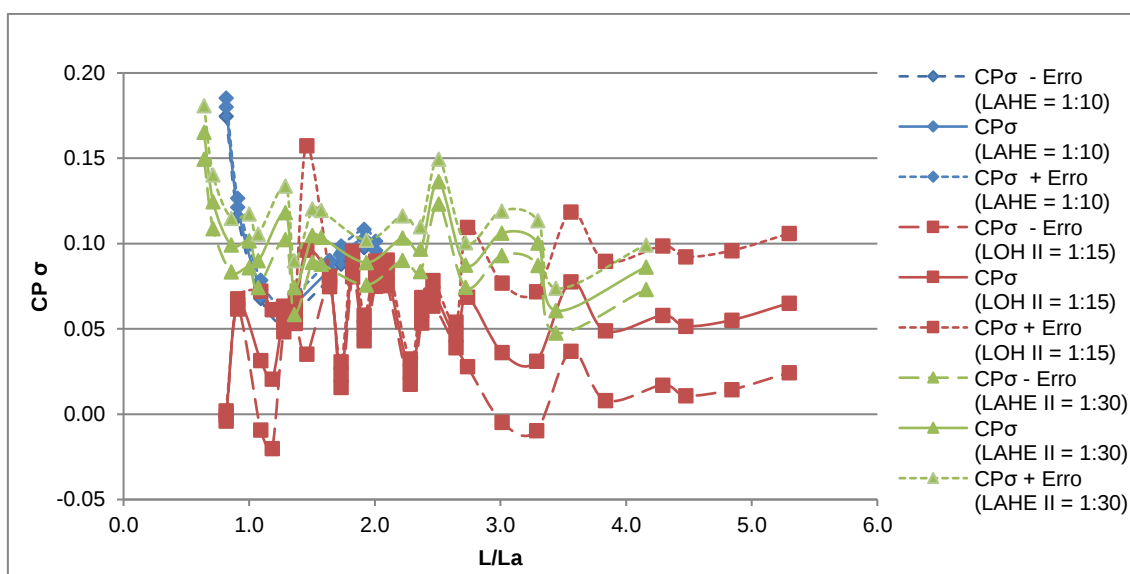
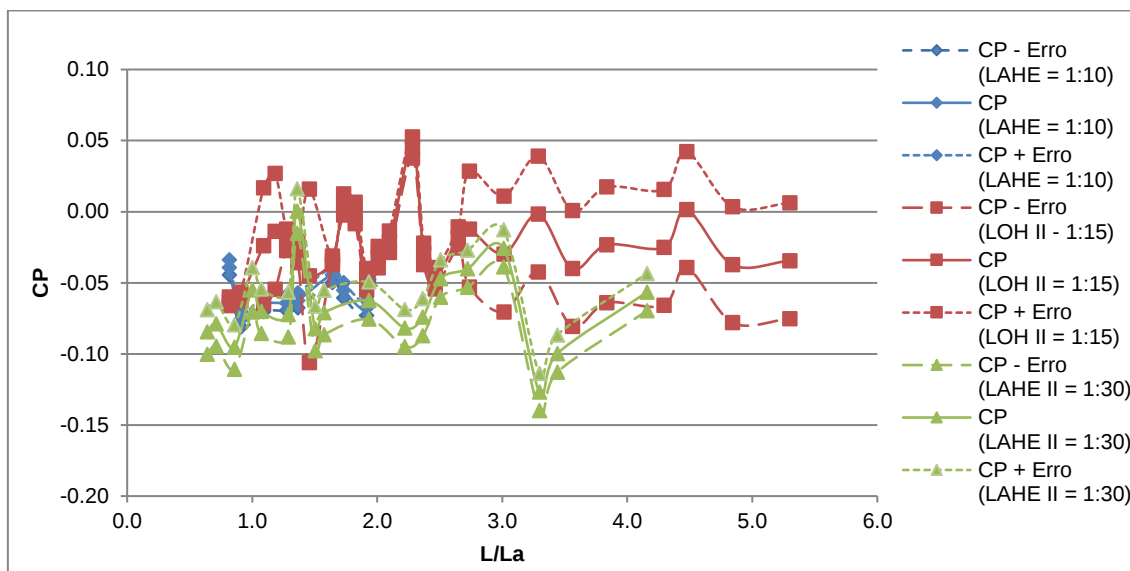
(b)

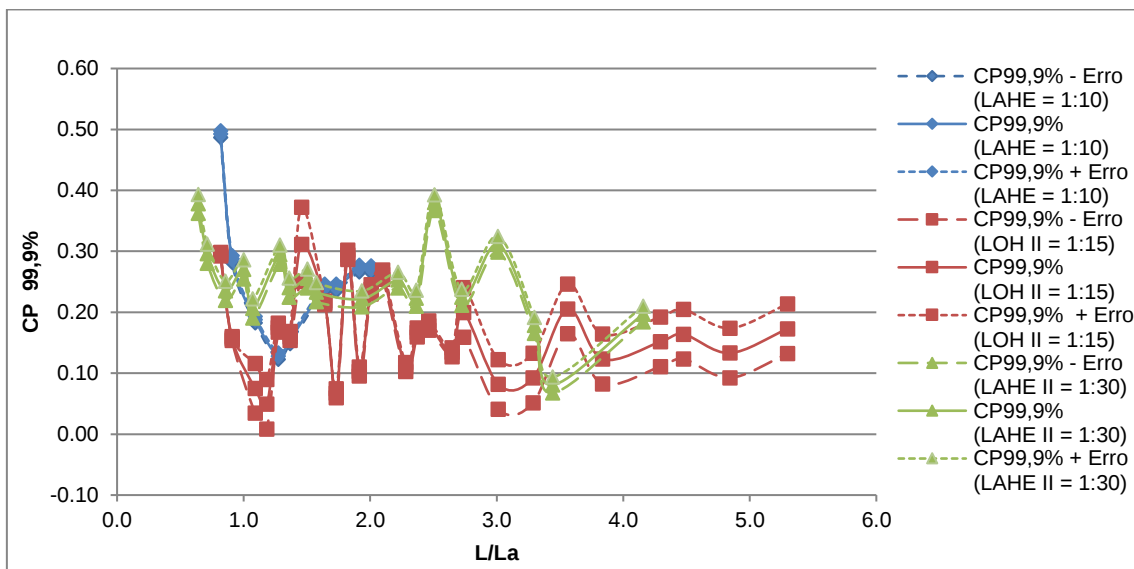
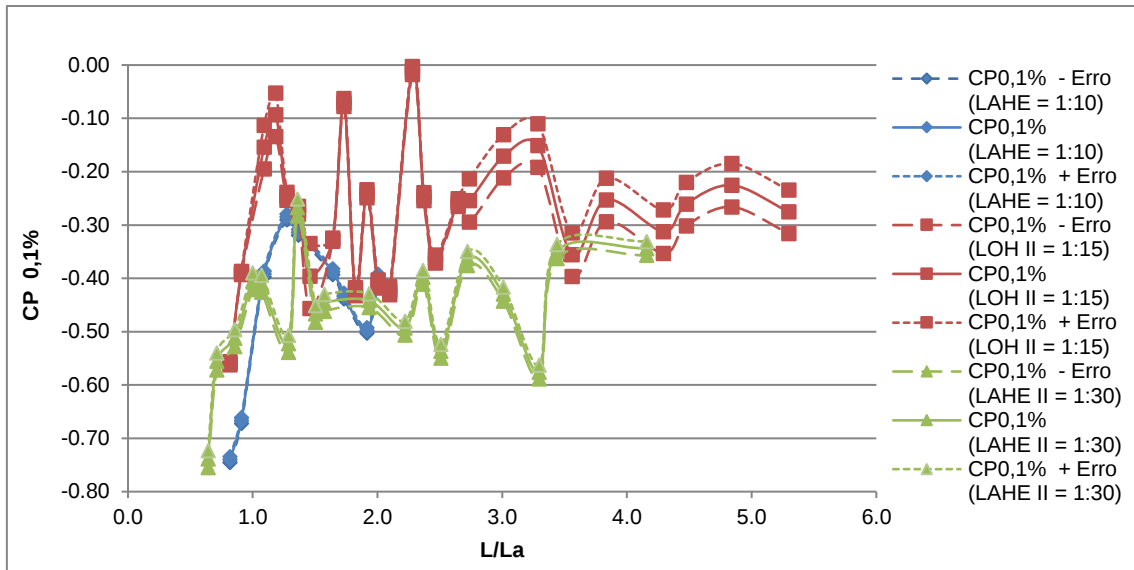
Apêndice O – Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



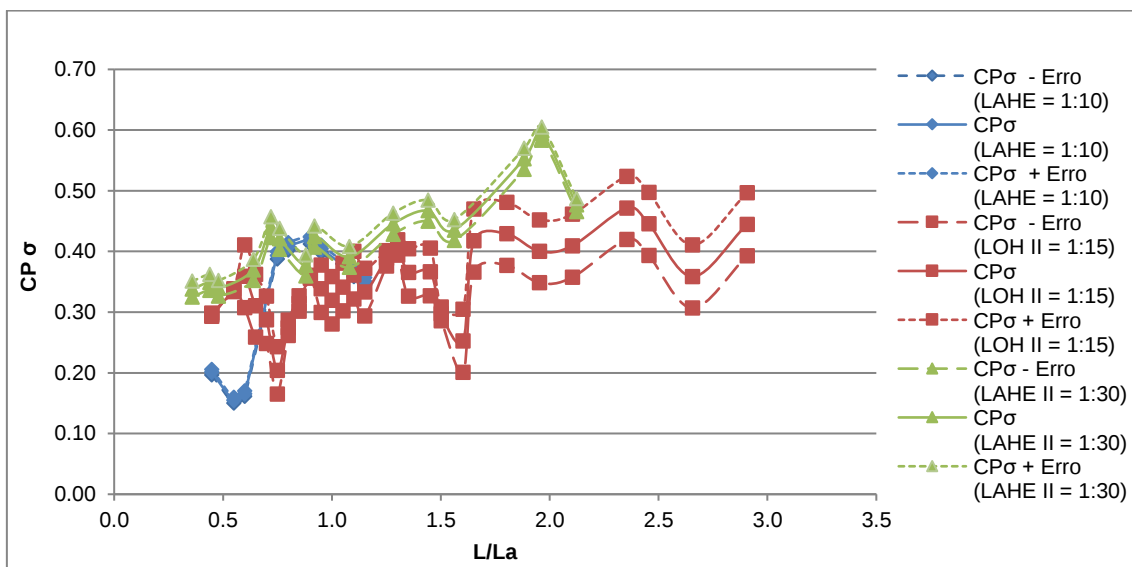
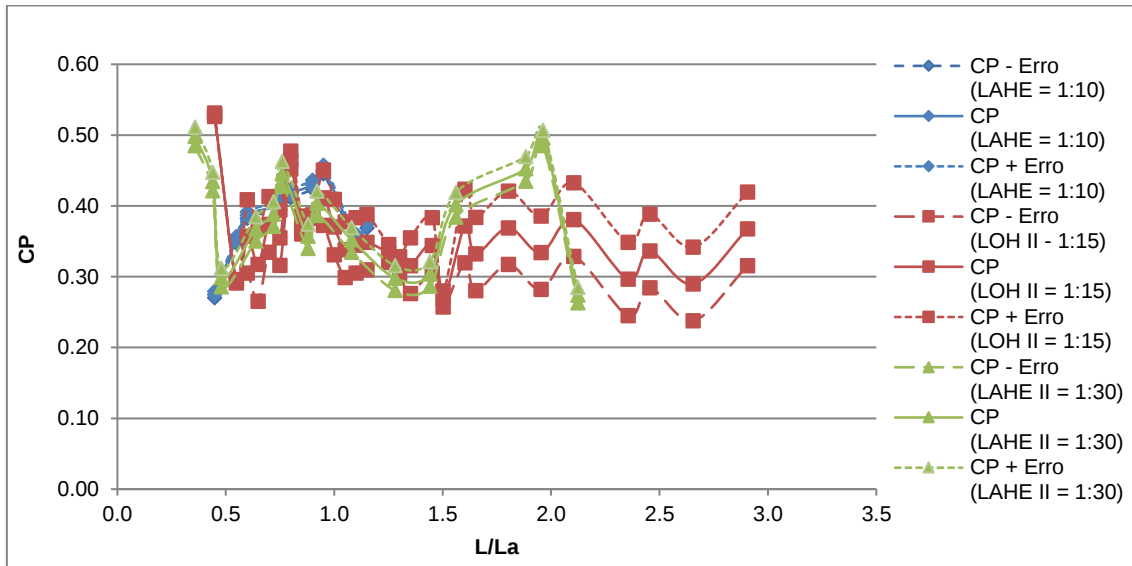


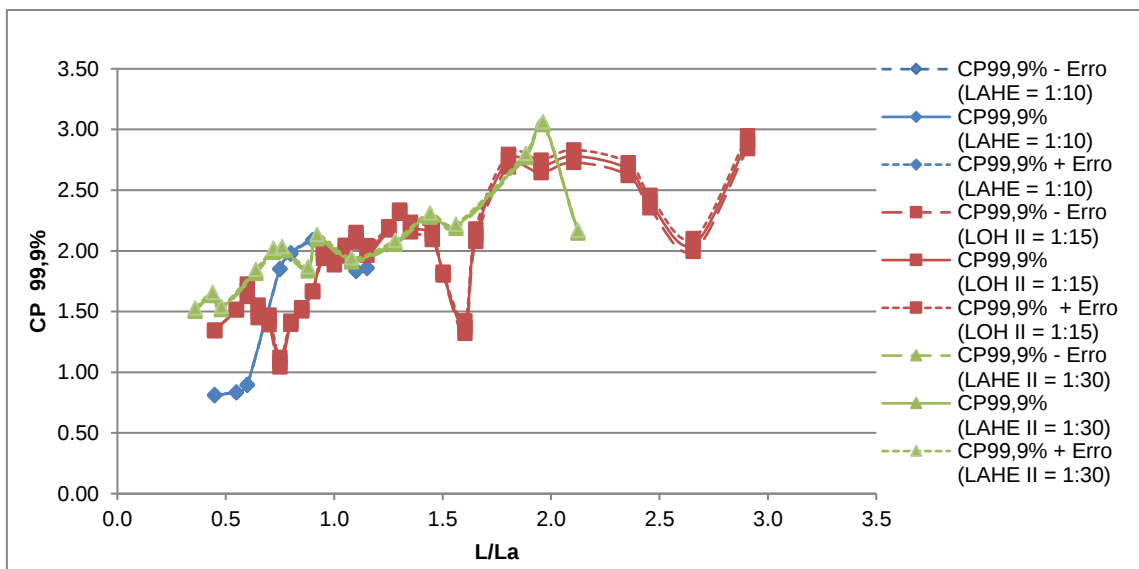
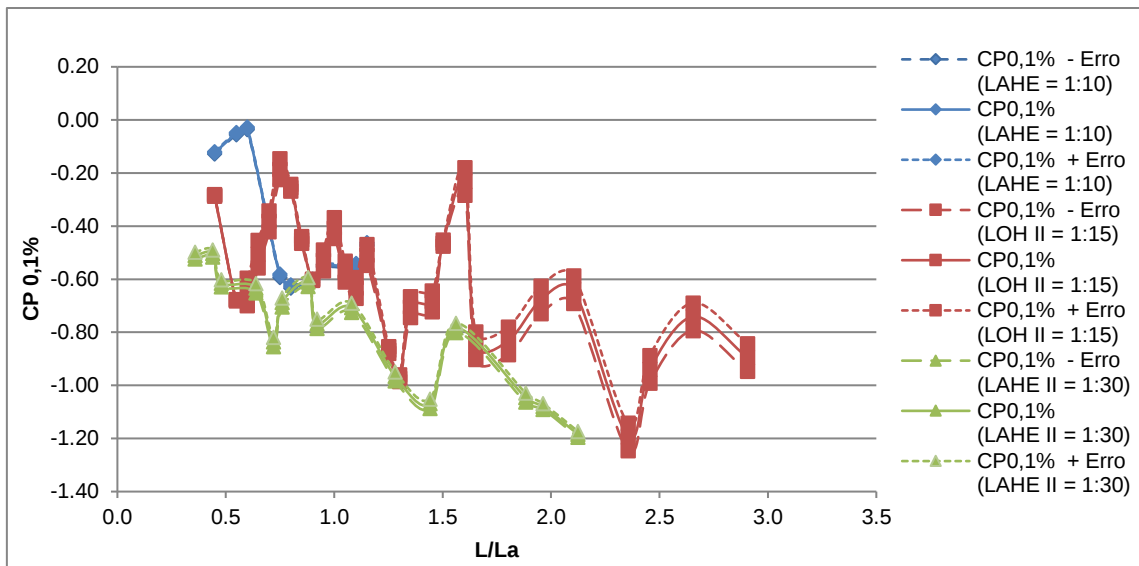
Apêndice P – Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q=3,1\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



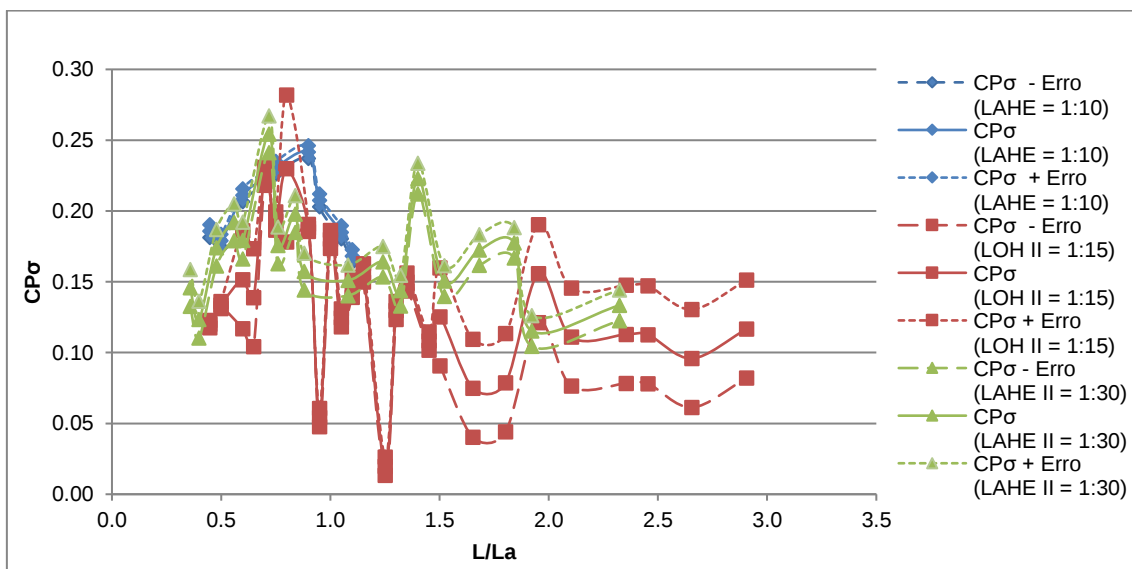
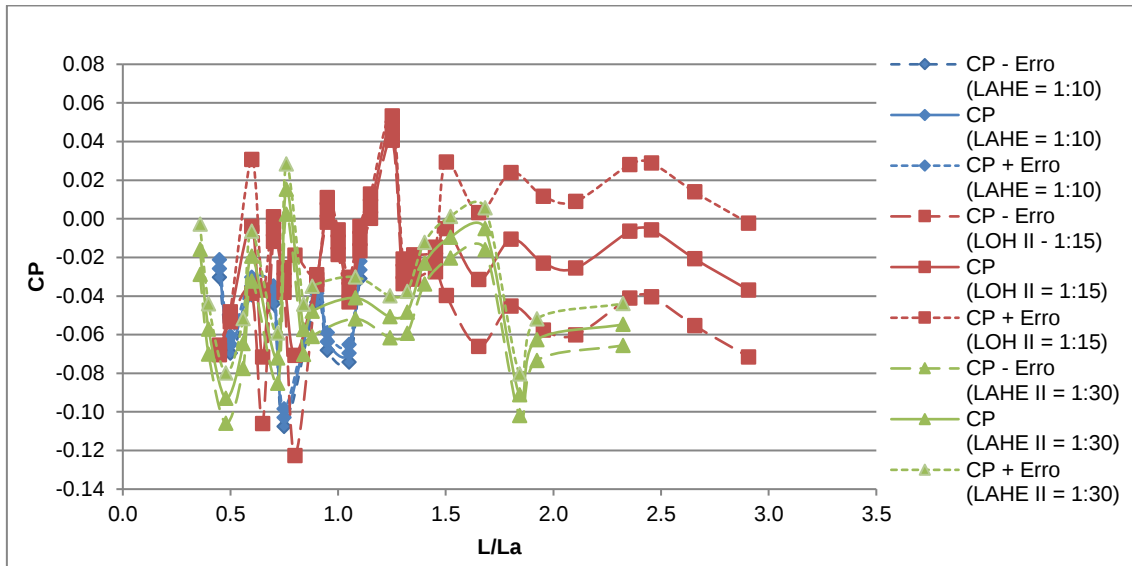


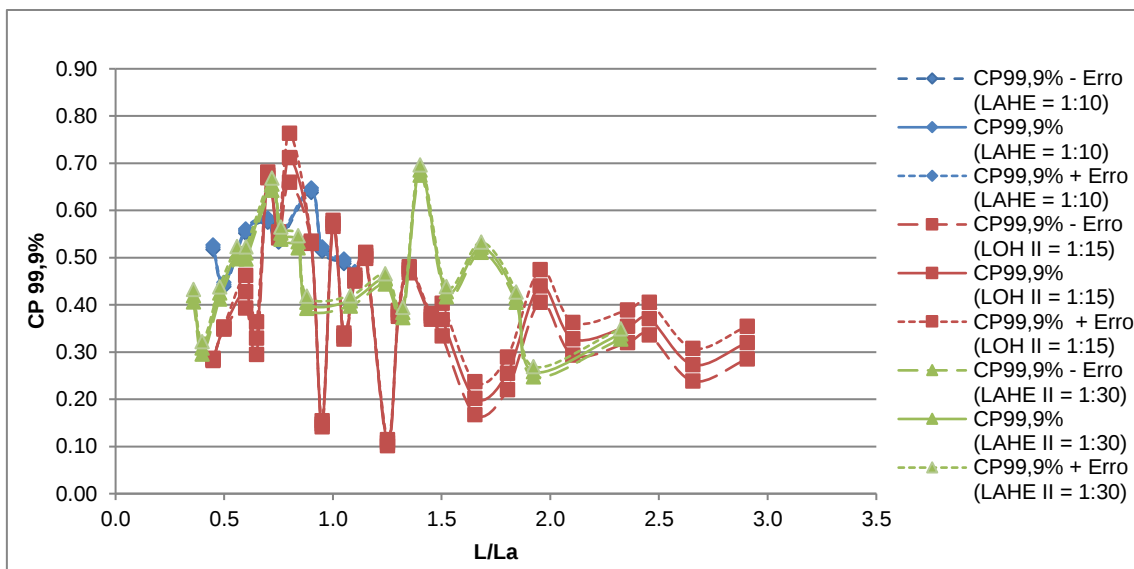
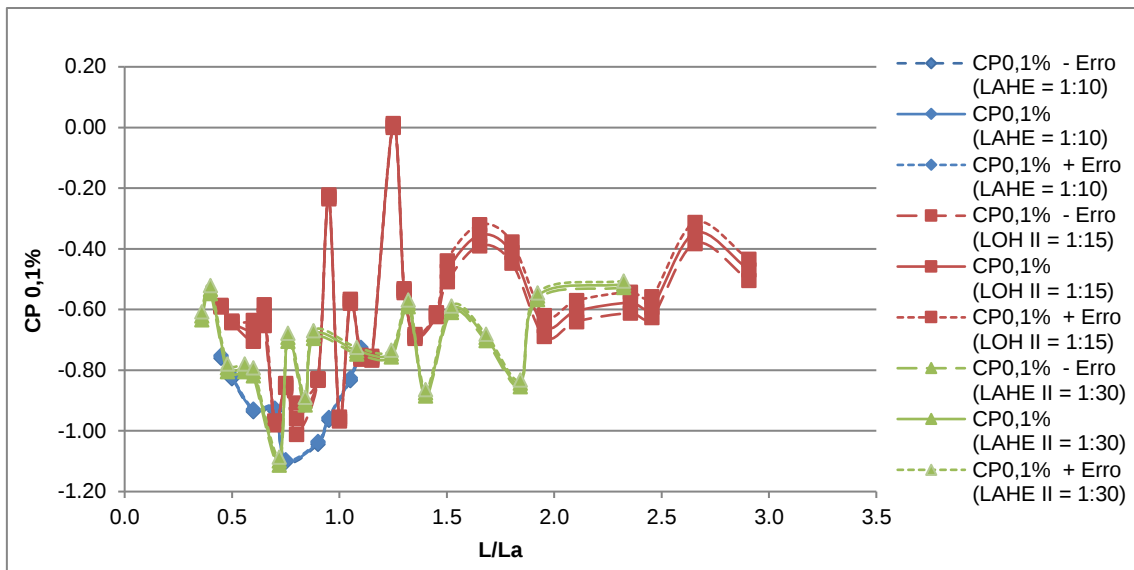
Apêndice Q – Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



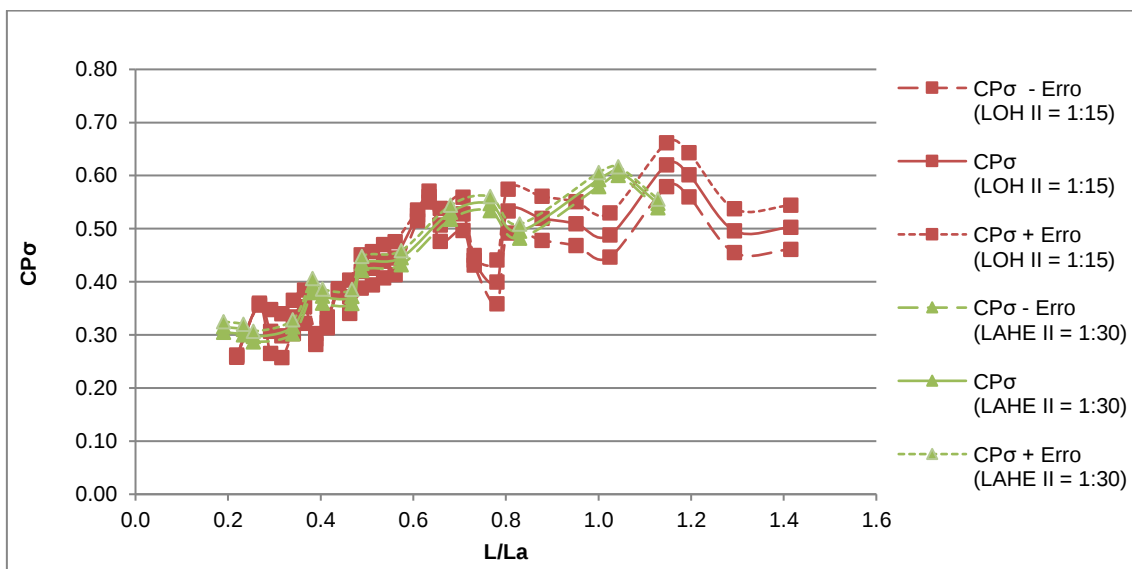
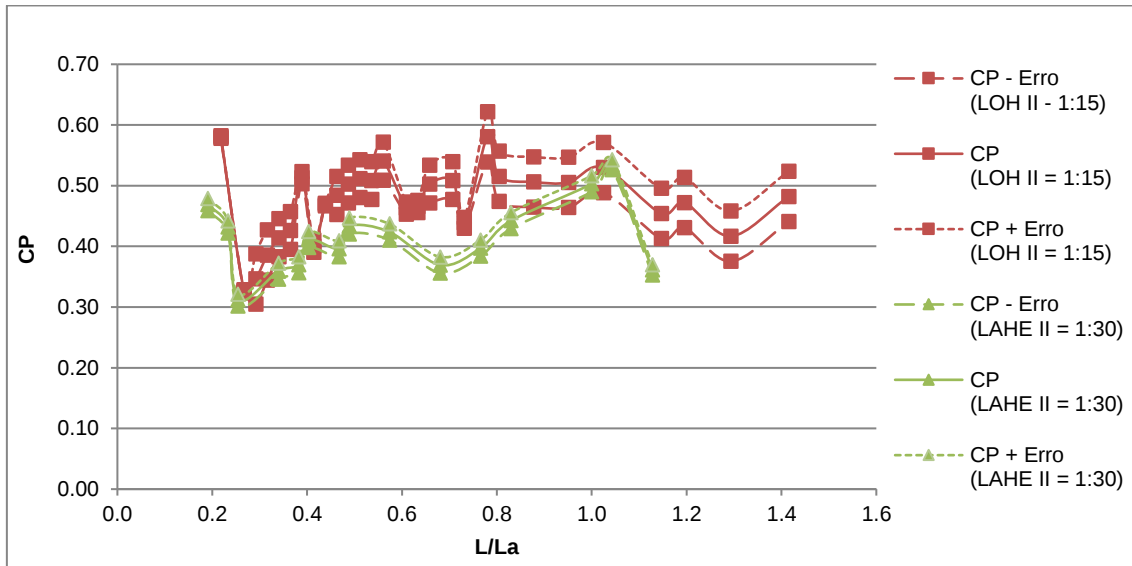


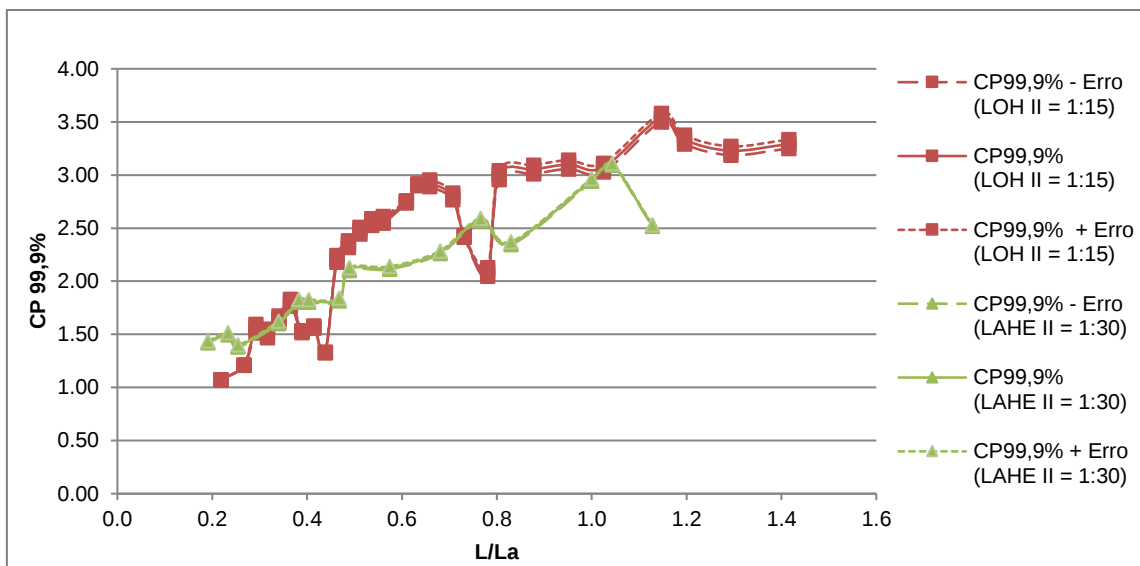
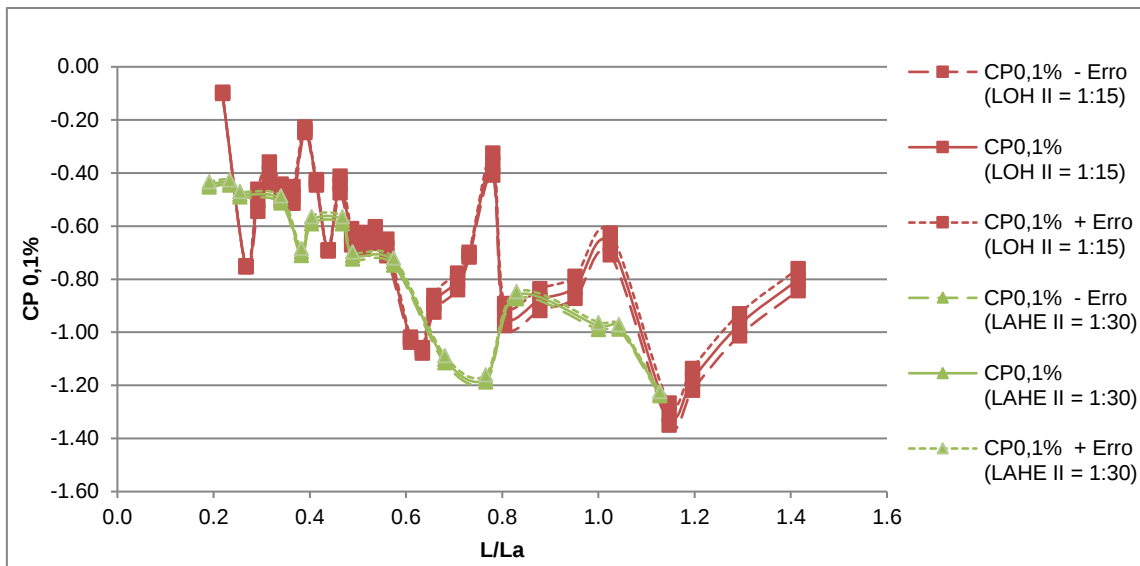
Apêndice R – Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus nos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



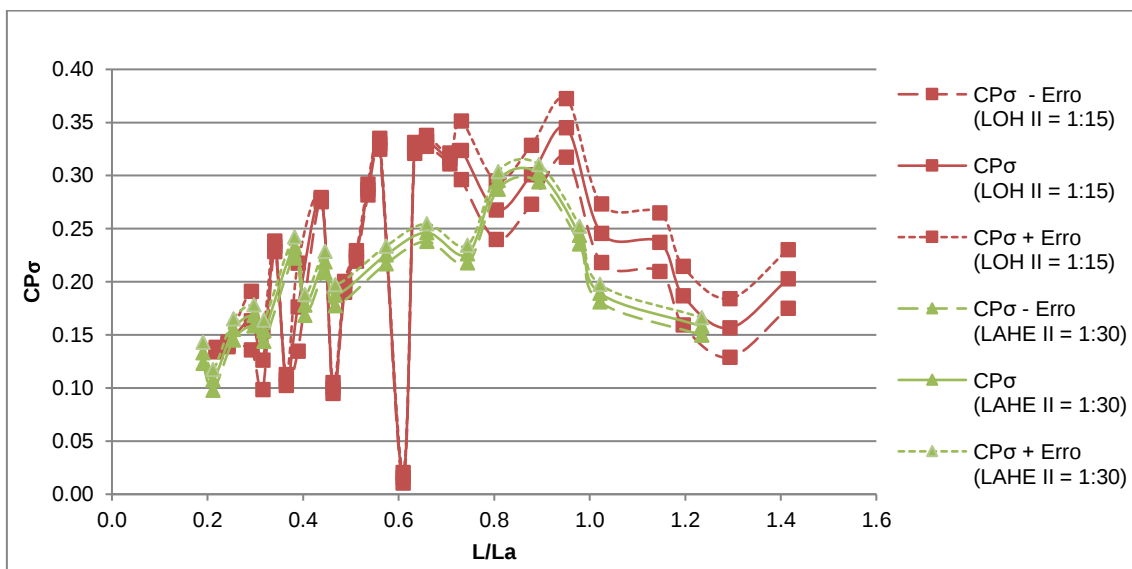
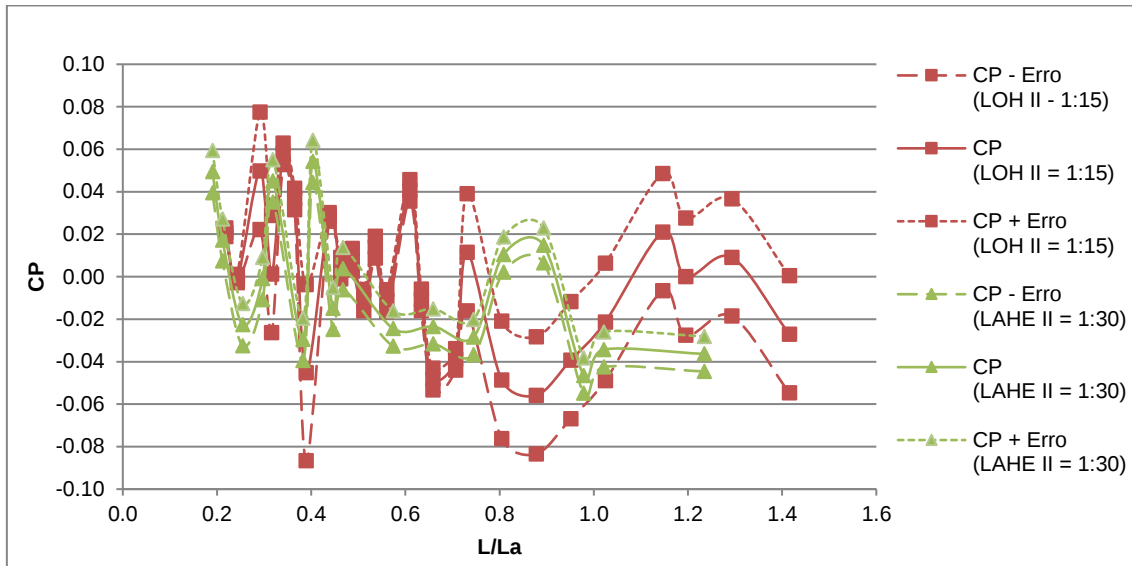


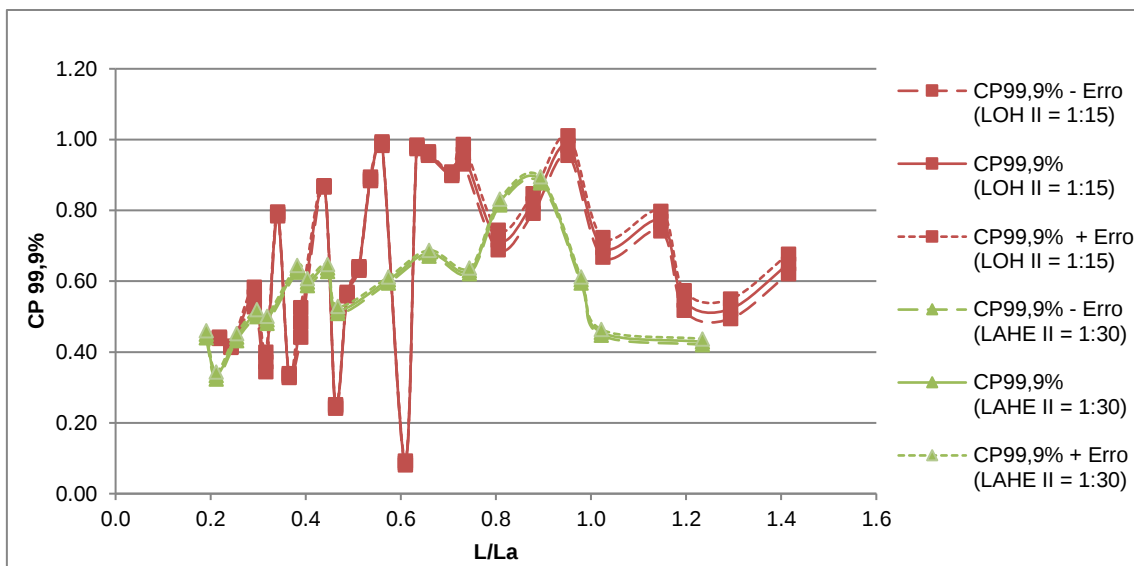
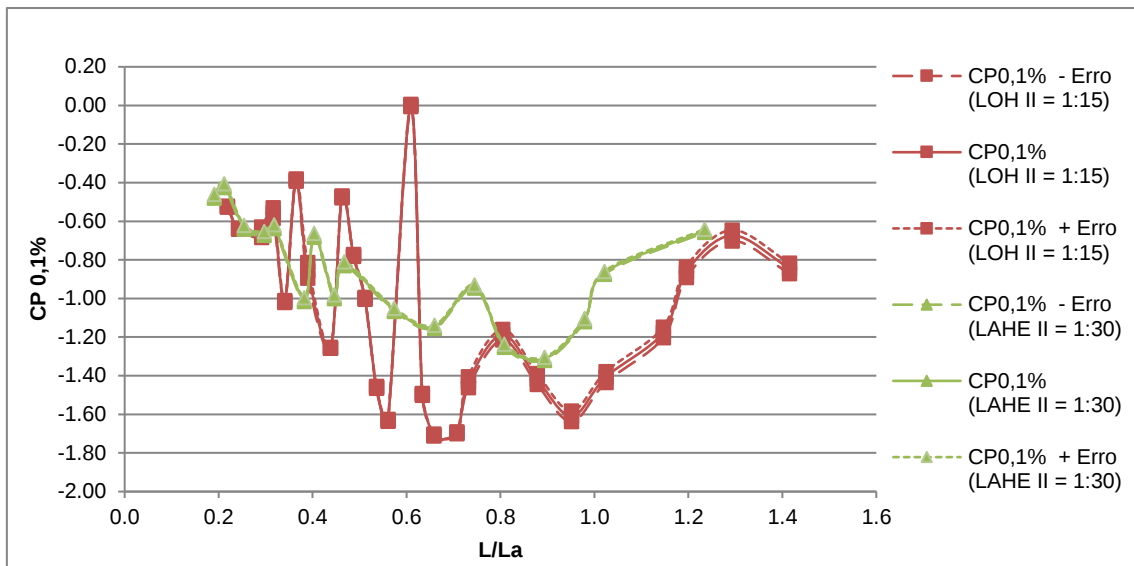
Apêndice S – Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos patamares dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



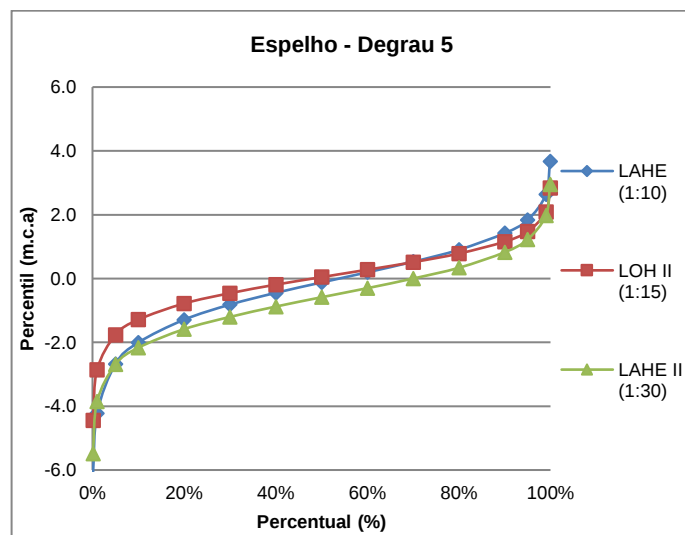
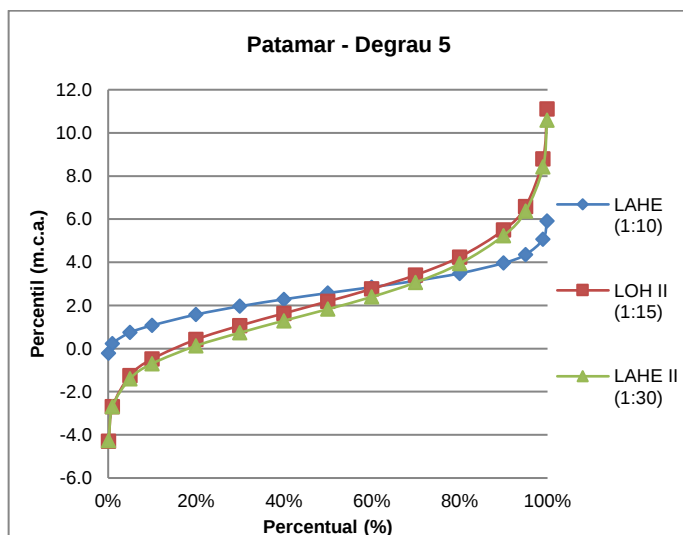
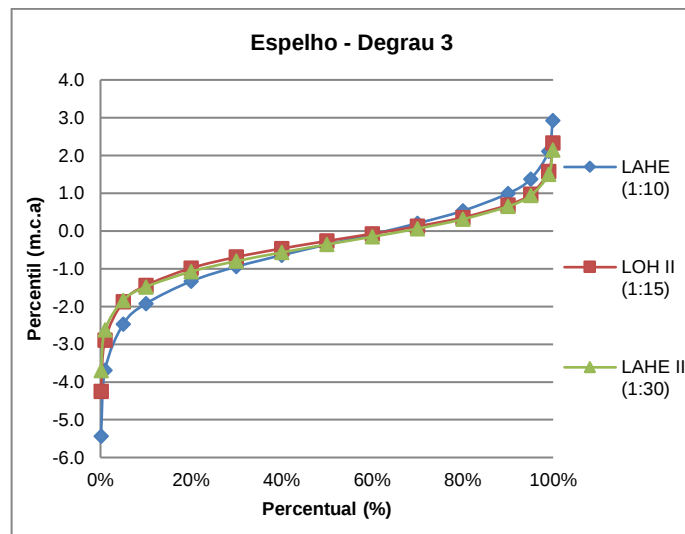
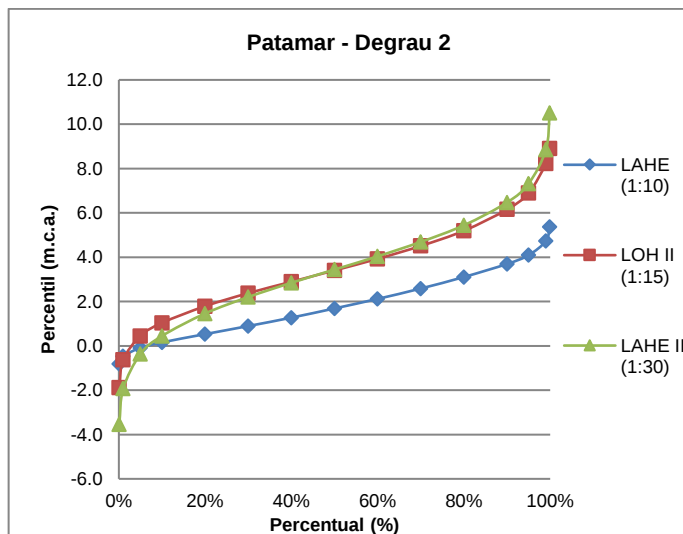


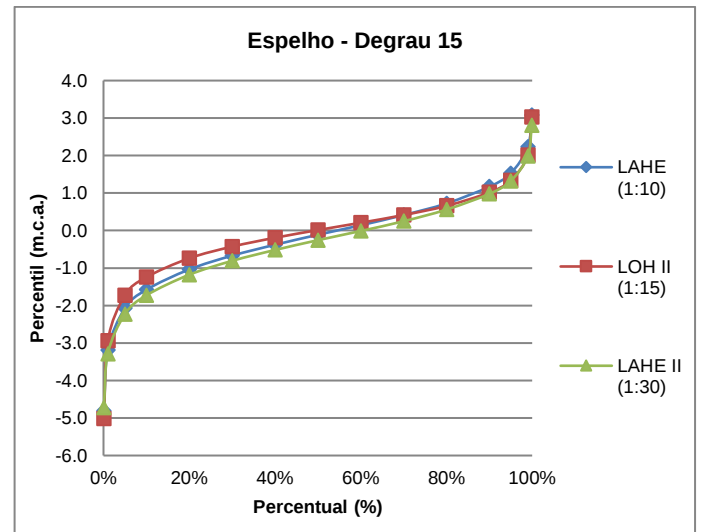
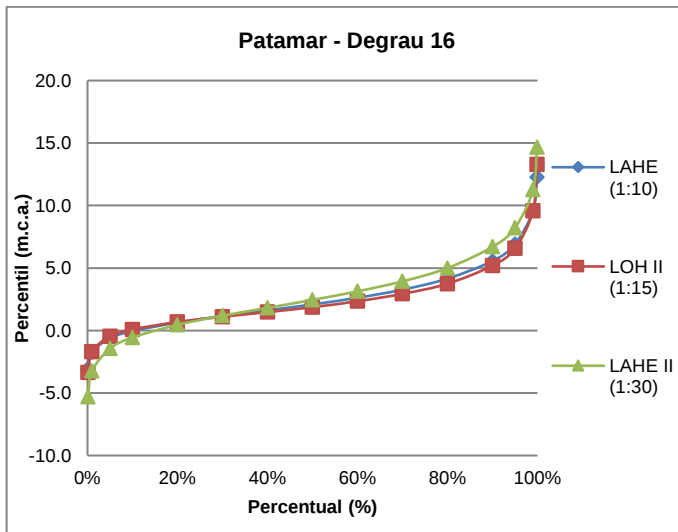
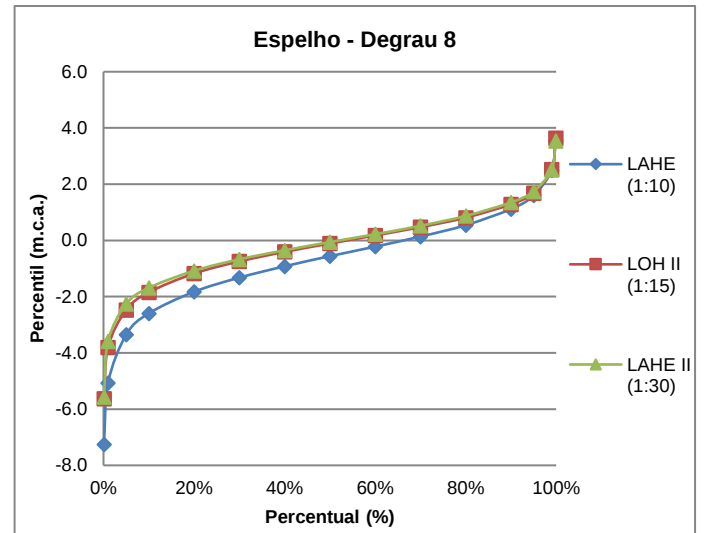
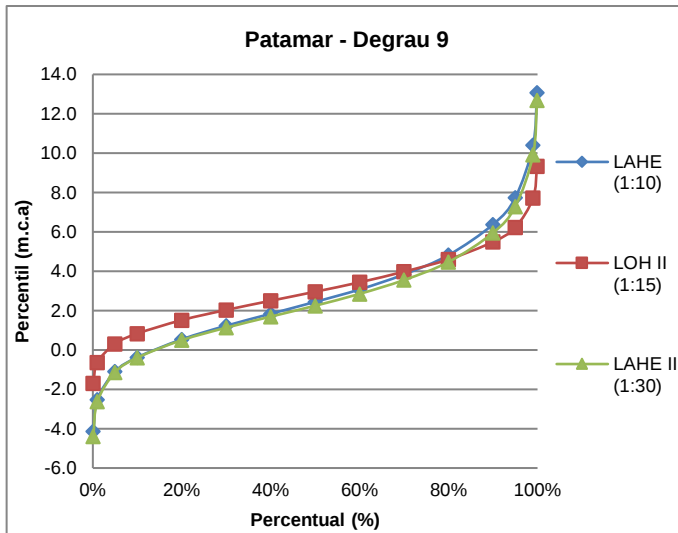
Apêndice T – Comparação da variação do coeficiente de pressão, considerando os erros dos transdutores instalados nos espelhos dos degraus dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II em função do adimensional L/L_a , para a vazão equivalente de $q_p=23,2\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.



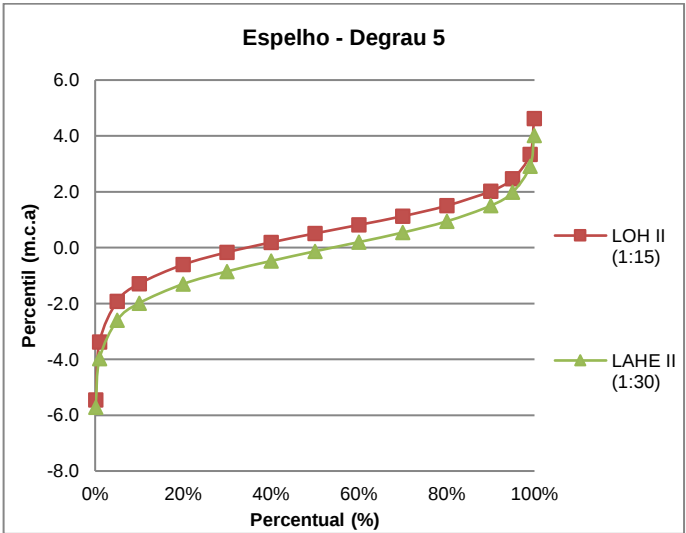
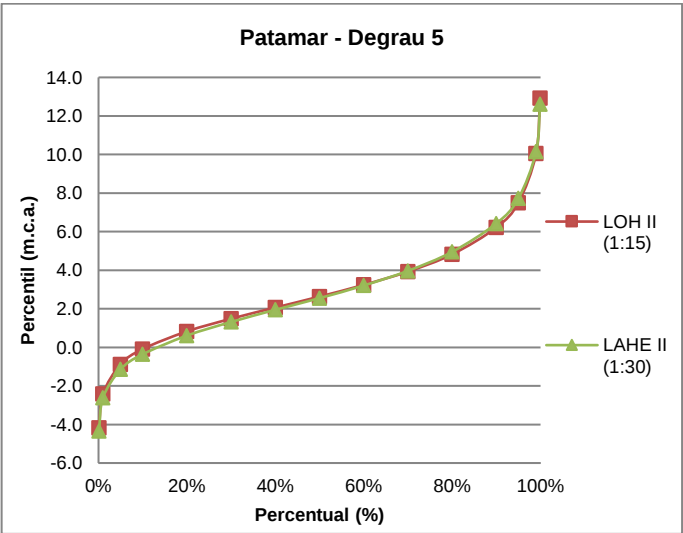
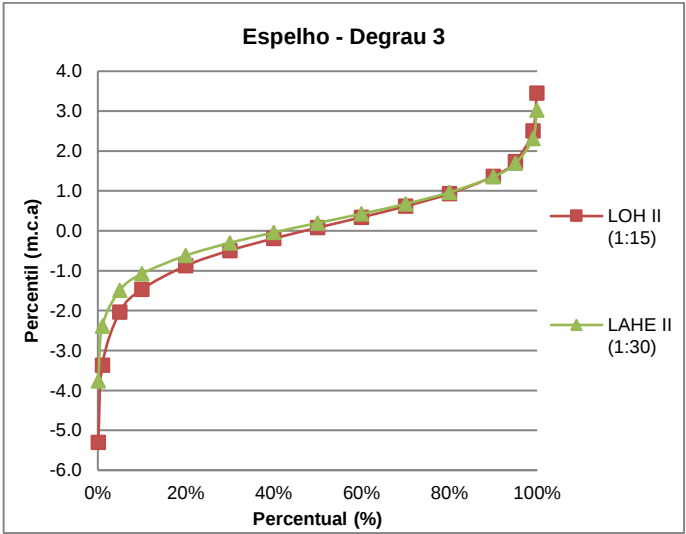
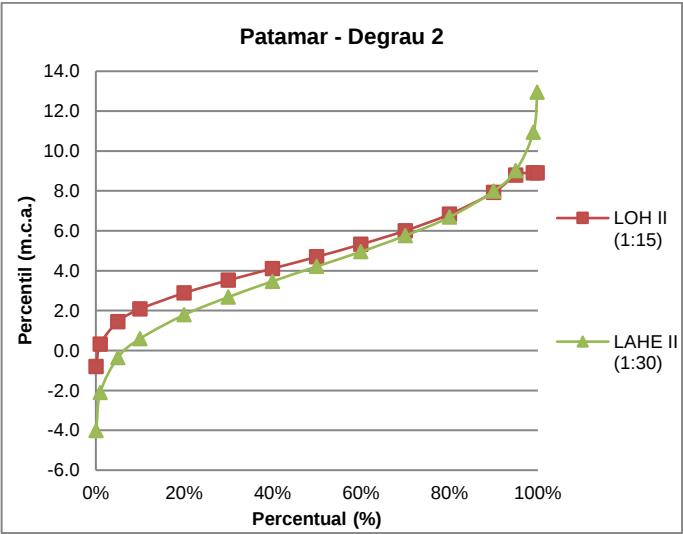


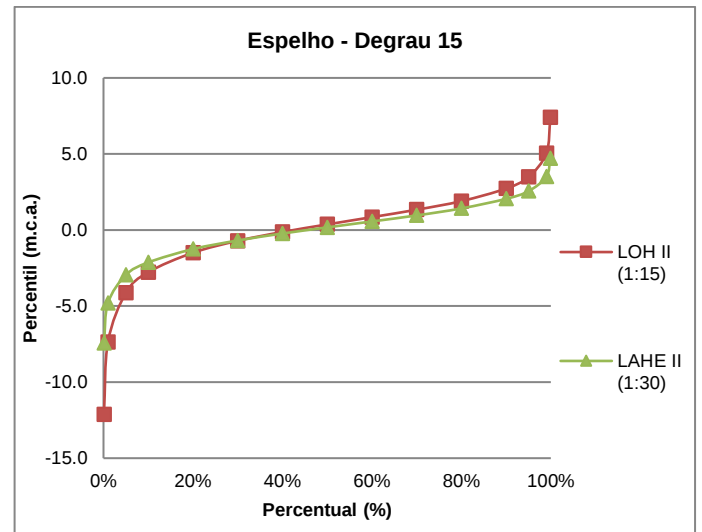
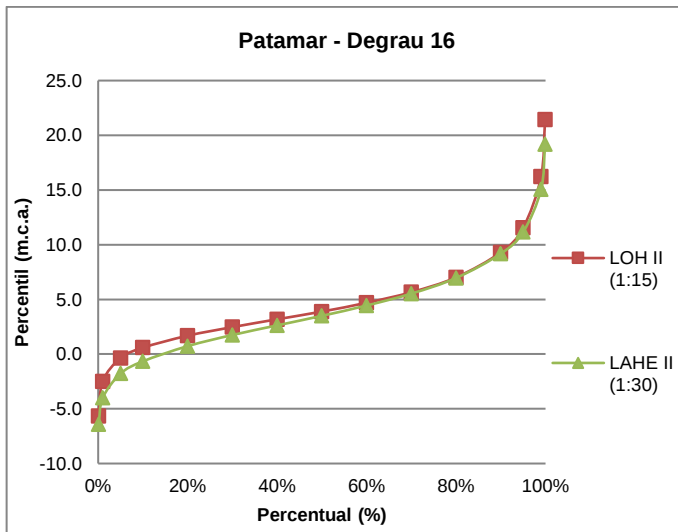
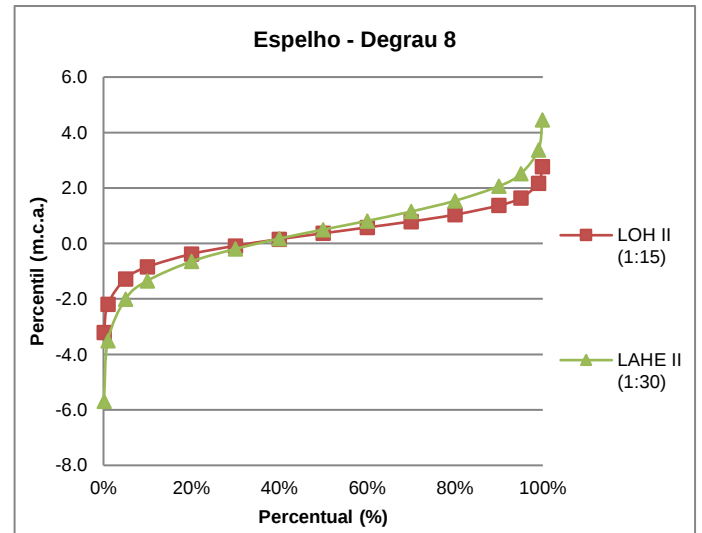
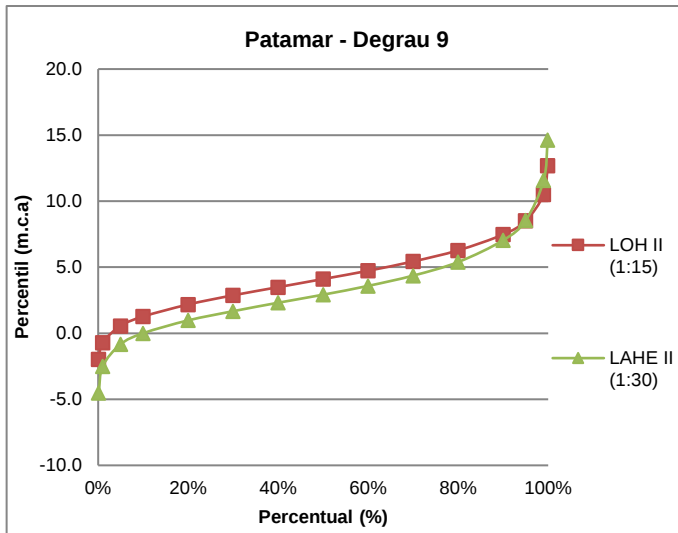
Apêndice U – Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas dos modelos LAHE, LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q=8,7\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$.





Apêndice V – Curva de probabilidade de ocorrência de pressões extremas dos modelos LOH II e LAHE II com vazão equivalente a $q=23,2\text{m}^3/\text{s/m}$





Anexos

• Transmissor de Pressão Industrial

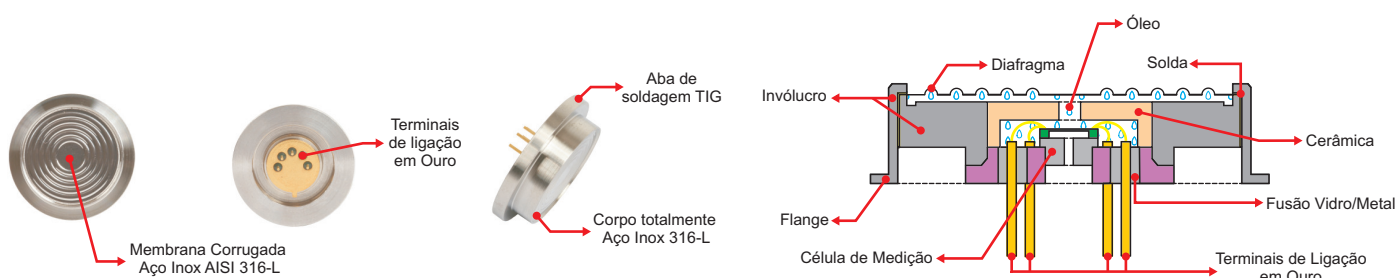
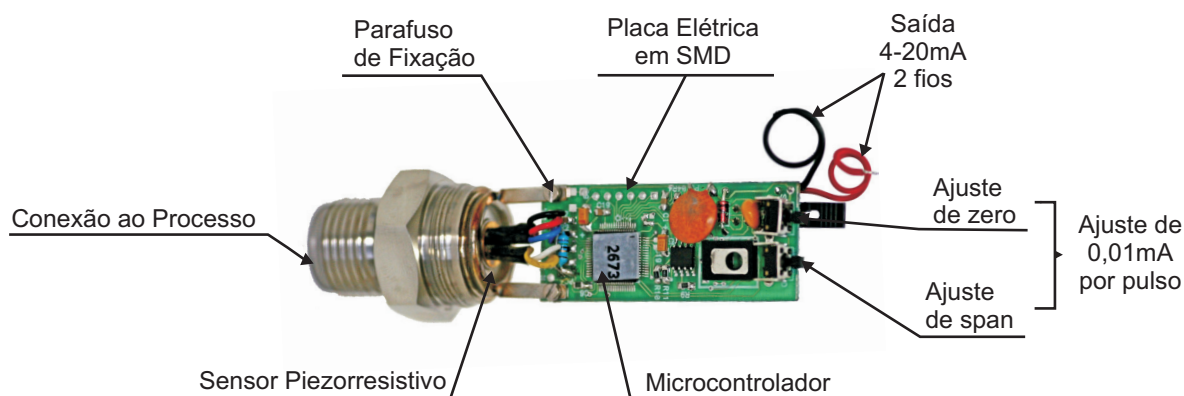
O PSI.420 é um transmissor de alta performance, seu sensor é totalmente em aço inox AISI 316/304. Compatível com a grande parte dos fluidos industriais em processos pneumáticos, hidráulicos, gases corrosivos. A eletrônica microcontrolada, garante precisão e durabilidade aliada a um sensor Piezorresistivo, onde as técnicas de fabricação são as mais atuais.

Características:

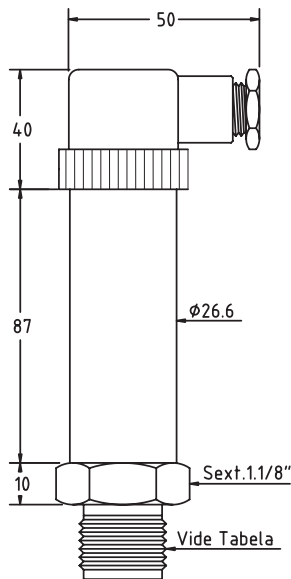
- Grau de proteção do Invólucro IP-65 (opcional IP-68 prensa cabo)
- Material do Invólucro aço inox AISI 304 (316 opcional)
- Faixa: de vácuo a 1600 Bar
- Vedações anéis o'ring, borracha nitrílica
- Conector DIN 43650
- Tipo de Sensor Piezorresistivo
- Sobrepressão (em pico) 1 x Fundo de escala (outra especificar)
- Sinal de Saída 4 - 20mA
- Precisão do Sinal 0,1%
- Resolução da Saída Analógica Infinita
- Temperatura do Fluido -10 +80°C (opcional até 400°C)
- Temperatura do Invólucro 55°C
- Zero e Span Ajustáveis 20% F.E. (Por PUSH BUTTON)
Ajuste de 0,01mA por pulso
- Vida Útil 70 x 10⁶
- Precisão, Histerese, Repetibilidade, Linearidade 0,25% F.E.
(Opcional: 0,05% F.E. ou 0,1% F.E.)
- Alimentação 9 a 30 Vcc
- Proteção total contra a rádio frequência (RF) e inversão de polaridade

Aplicações

Processos: Hidráulicos, Pneumáticos, Líquidos e Gases corrosivos ou não



Dimensões



Esquema de Ligação

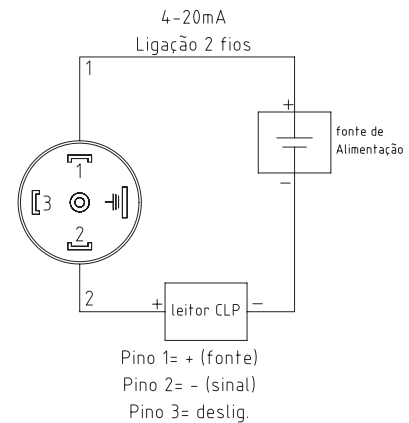
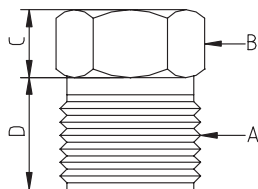


Tabela A - Conexões ao Processo

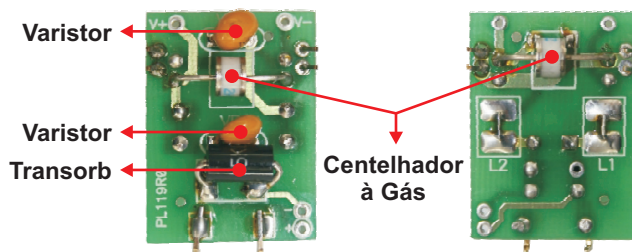


Cód.	A	B	C	D
14-B	1/4" BSP	Sext. 22,22	10	13
14-N	1/4" NPT	Sext. 22,22	10	13
12-B	1/2" BSP	Sext. 22,22	10	17
12-N	1/2" NPT	Sext. 22,22	10	17
34-B	3/4" BSP	Sext. 22,22	10	18
34-N	3/4" NPT	Sext. 22,22	10	18
1-N	1" NPT	Sext. 22,22	10	22
1-N	1" NPT	Sext. 22,22	10	22
Outra, especificar				

Tabela B - Pressão Relativa/Absoluta

Cód.	Pressão Relativa		
	Bar	Kgf/cm ²	PSI
020	0,2	0,2	3,0
1	1	1,02	14,51
7	7	7,14	101,57
14	14	14,28	203,14
21	21	21,42	304,71
70	70	71,4	1015,7
140	140	142,8	2031,4
200	200	204	2902
350	350	357	5078,5
700	700	714	10157
1000	1000	1020	14510
1600	1600	1632	23216
Cód.	Pressão Absoluta		
	Bar	Kgf/cm ²	PSI
1A	1	1,02	14,51
3A	3	3,06	43,53
7A	7	7,14	101,57
10A	10	10,2	145,1

Opcional - Placa Anti-Surto (Cod. PCG)



Nota: Para outros sinais de saída ver modelo PSI.010 (0-10/0-5/1 à 5).

Código para pedido:

PSI.420

12-B

200

PCG

Transmissor
de pressãoTabela A
Conexões ao
processoTabela B
Pressão
Relativa/Absoluta

Opcional

Obs.: Para grau de proteção IP-68 informar comprimento do cabo

TRANSDUTORES DE ALTA EXATIDÃO

SILÍCIO MICROUSINADO

INTERVALOS DE PRESSÃO COMPOSTA

Intervalos de pressão composta
mV/V, saídas de tensão ou
corrente

PX409-015CGV ± 15 psi,
classificação IP67, intervalo
mostrado em escala real.

Estilo do cabo.

Estilo
miniconector DIN.

PX419-001CGI ± 1 psi,
classificado IP65, intervalo
bidirecional mostrado em
escala real.

Série PX409



Padrão

- ✓ Alta exatidão de $\pm 0,08\%$ BSL, incluindo linearidade, histerese e repetibilidade
- ✓ Amplo intervalo de compensação de temperatura, de -29 a 85°C (de 20 a 185°F)
- ✓ Extensão de desempenho Premium de temperatura: $\pm 0,5\%$ sobre o intervalo compensado
- ✓ CAL-5 rastreável pelo NIST incluída
- ✓ Todas as partes úmidas em aço inoxidável
- ✓ Tempo de resposta rápido
- ✓ Confiabilidade e estabilidade de estado sólido
- ✓ Pressão de prova mínima de 400%

Transdutores bidirecionais OMEGA, série PX409, modelos de intervalo de pressão de tensão, têm todas as peças de aço inoxidável úmido e construção soldada e compensação de temperatura premium, o que os torna adequados para uso em ambientes industriais difíceis.

Os transdutores de intervalo composto estão disponíveis em 5 intervalos, que medem a pressão de tensão positiva e negativa, e fornecem saídas bidirecionais correspondentes de ± 10 mV/V, ± 5 Vcc e de 4 a 20 mA com ambiente ajustado a 12 mA. Os intervalos estão disponíveis de 10 polH₂O a ± 15 psi.

ESPECIFICAÇÕES

Saída:

Em milivolts: de 0 a 10 mV/V para vácuo, ± 10 mV/V para composto

Tensão amplificada: de 0 a 5 Vcc para vácuo, ± 5 Vcc para composto

Circuito de corrente: de 4 a 20 mA (12 mA a 0 psig em intervalos compostos)

Requisitos de energia:

Em milivolts: de 5 a 10 Vcc (2 mA a 10 Vcc)

Tensão amplificada: de 10 a 30 Vcc a 10 mA

Circuito de corrente: de 9 a 30 Vcc [res máx. circuito = $(V_s - 9) \times 50$]; [de 9 a 20 Vcc acima de 105°C (229°F)]

Compatível com CE: Atende às normas de emissão industrial e de imunidade EN61326

Exatidão (linearidade, histerese e repetibilidade combinadas): $\pm 0,08\%$ BSL máx., calibrado apenas no sentido positivo, com conector elétrico para cima

Equilíbrio Zero: $\pm 0,5\%$ FE típico, 1% máx. (1% típico, 2% máx. para intervalos de 1 psi e abaixo)

Ajuste de intervalo: $\pm 0,5\%$ FE típico, 1% máx. (1% típico, 2% máx. para intervalos de 1 psi e abaixo)

Intervalo de temperatura operacional: de -45 a 121°C (de -49 a 250°F) [de -45 a 115°C (de -49 a 240°F), saídas de para tensão ou corrente]

Temperatura compensada:

Intervalos > 5 psi: -29 a 85°C (-20 a 185°F)

Intervalos ≤ 5 psi: -17 a 85°C (0 a 185°F)

Efeitos Térmicos Zero (a 0 psig sobre o intervalo compensado):

Intervalos > 5 psi: $\pm 0,5\%$ de intervalo

Intervalos > 5 psi: $\pm 1,0\%$ de intervalo

Intervalo de efeitos térmicos (em intervalo compensado):

Intervalos > 5 psi: $\pm 0,5\%$ de intervalo

Intervalos > 5 psi: $\pm 1,0\%$ de intervalo

Estabilidade a longo prazo (1 ano):

Tipicamente $\pm 0,1\%$ FE

Choque: 50 g, meio seno de 11 ms, eixo vertical e horizontal

Vibração: 5-2000-5 Hz, ciclo de 30 minutos, Curva L, Mil Spec 810, figura 514-2-2, eixo vertical e horizontal

Tempo de Resposta: < 1 ms

Largura de Banda: CC a 1 kHz, típico

Pressão de prova (direção positiva):

10 polH₂O: 10 vezes com escala completa

1 psi: 6 vezes com escala completa

2,5 psi e superior: escala completa 4 vezes (direção negativa 4 vezes ou 1 atmosfera, o que for maior)

Pressão de ruptura:

10 polH₂O a 5 psi: 1000 psi

15 e superior: 3000 psi

Terminação elétrica:

PX409: Cabo de 2 m (6') integral

PX419: miniconector DIN.

PX429: fecho rotativo

PX459: M12

Conectores acoplados:

PX419: CX5302 (incluído)

PX429: PT06F10-6S (vendido separadamente)

Proteção ambiental:

PX409: IP67

PX419, PX429 e PX459: IP65

Partes úmidas: 316 de aço inoxidável

Porta de pressão: $\frac{1}{4}$ -18 NPT, macho

Calibração: É fornecido com certificado de CAL-5 (leitura positiva apenas, para intervalos compostos)

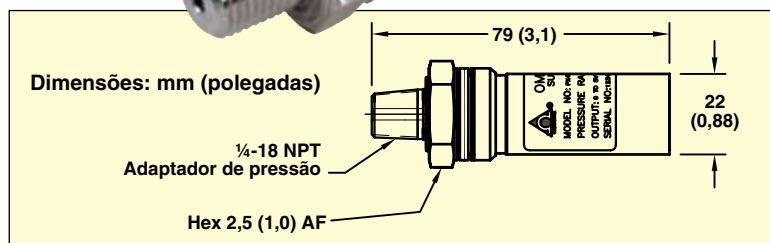
Peso: 115 a 200 g (4 a 7 onças) (dependendo da configuração)

TRANSDUTORES DE ALTA EXATIDÃO INTERVALOS DE PRESSÃO COMPOSTA



Modelos personalizados disponíveis!

- ✓ Use nosso conveniente configurador de transdutor online para escolher as características que queira
- ✓ Acesse omega.com/pxconfig para obter detalhes



Para fazer pedido

MEDIDOR DE PRESSÃO	INTERVALO Calibração em mbar PRESSÃO	CABO DE 2 M (6') TERMINAÇÃO Nº SO MODELO*	TERMINAÇÃO MINI DIN Nº SO MODELO*	FECHO ROTATIVO TERMINAÇÃO Nº SO MODELO	TERMINAÇÃO DE CONEXÃO M12 Nº SO MODELO
SAÍDA de 0 a 100 mV (a 10 Vcc)					
±10 polH ₂ O	±25	PX409-10WCGV	PX419-10WCGV	PX429-10WCGV	PX459-10WCGV
±1	±69	PX409-001CGV	PX419-001CGV	PX429-001CGV	PX459-001CGV
±2,5	±172	PX409-2.5CGV	PX419-2.5CGV	PX429-2.5CGV	PX459-2.5CGV
±5	±345	PX409-005CGV	PX419-005CGV	PX429-005CGV	PX459-005CGV
±15	±1034	PX409-015CGV	PX419-015CGV	PX429-015CGV	PX459-015CGV
SAÍDA DE 0 a 5 Vcc					
±10 polH ₂ O	±25	PX409-10WCG5V	PX419-10WCG5V	PX429-10WCG5V	PX459-10WCG5V
±1	±69	PX409-001CG5V	PX419-001CG5V	PX429-001CG5V	PX459-001CG5V
±2,5	±172	PX409-2.5CG5V	PX419-2.5CG5V	PX429-2.5CG5V	PX459-2.5CG5V
±5	±345	PX409-005CG5V	PX419-005CG5V	PX429-005CG5V	PX459-005CG5V
±15	±1034	PX409-015CG5V	PX419-015CG5V	PX429-015CG5V	PX459-015CG5V
SAÍDA DE 4 a 20 mA					
±10 polH ₂ O	±25	PX409-10WCGI	PX419-10WCGI	PX429-10WCGI	PX459-10WCGI
±1	±69	PX409-001CGI	PX419-001CGI	PX429-001CGI	PX459-001CGI
±2,5	±172	PX409-2.5CGI	PX419-2.5CGI	PX429-2.5CGI	PX459-2.5CGI
±5	±345	PX409-005CGI	PX419-005CGI	PX429-005CGI	PX459-005CGI
±15	±1034	PX409-015CGI	PX419-015CGI	PX429-015CGI	PX459-015CGI

ACESSÓRIOS

Nº DO MODELO	DESCRIÇÃO
M12C-PVC-4-S-F-5	Cabo de PVC, em linha reta conector fêmea de 4 pinos M12 em uma extremidade e cabo móvel em uma ponta, 5 m (16,4') de comprimento, para PX459
M12C-PVC-4-R-F-5	Cabo de PVC, ângulo reto, de 4 pinos, M12, conector fêmea em uma extremidade, cabo móvel em uma extremidade, 5 m (16,4') de comprimento, para PX459

É fornecido completo com CAL-5 rastreável pelo NIST.

* Para encomendar a versão do cabo com montagem de eletroduto 1/2 NPT, especifique o modelo PX409C, sem nenhum custo extra.

** Para encomendar com saída de 0 a 10 Vcc, troque "5V" para "10V" no número do modelo, sem nenhum custo extra. Roscas e intervalos métricos também disponíveis, consulte omega.com/pxconfig

Exemplos de pedido: PX409-015CGV, terminação do cabo, intervalo de ±15 psig, saída de 10 mV/V.

PX419-001CG5V, mini terminação DIN, ± 1 intervalo de psi, saída de 0 a 5 Vcc.



MANUAL DO USUÁRIO

Manual de Instalação, Operação e Manutenção



SP-Série

Transmissor de Pressão

Índice

Introdução	3
Modelos e Dimensões	4
Conexões Elétricas	7
Pré Instalação	10
Instalação	11
Calibração	13
Manuseio de Manutenção	14
Especificações Técnicas	15
Solução de Pequenos Problemas	23
Código de Pedido	24
Termos e Condições	25

SP-Série

Transmissor de Pressão



Os transmissores de Pressão série SP são projetados para medição de nível e pressão.

Os modelos são montados com conexão de processo em rosca ou flange com um módulo eletrônico interno. Todos os transmissores tem saída 4..20mA (2fios) e modelos com ajuste de Zero e Span, operam com excelente estabilidade, repetibilidade, precisão e compensação e de temperatura. Comunicação HART também está disponível.

Por atuarem com diferentes ranges de pressão podem ser usados em muitas aplicações incluindo líquidos, gases, ambiente com espaço limitado, indústria alimentícia, ambiente agressivo tais como: esgoto com sólidos em suspensão.

Tecnologia

Utilizando o princípio de alteração de resistência ou capacitância aplicada em uma célula diafragma piezo-resistiva, confeccionada em aço-inox 316, ou numa célula diafragma capacitiva cerâmica.

A força externa da pressão do processo induz o deslocamento de cargas elétricas que se acumulam sobre a superfície aposta da célula, gerando um sinal de saída que é convertido num sinal 4...20mA(2 fios) padrão 1 a 5V (3 fios opcional sob pedido), diretamente proporcional à pressão aplicada.

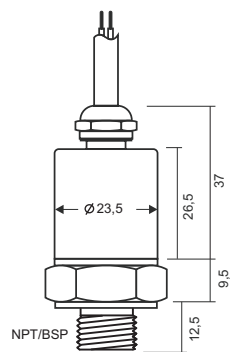
Características

- Pequeno, robusto e fácil instalação
- Medição confiável de nível e pressão.
- Protocolo de comunicação Hart disponível (para modelos sem cabeçote)
- Disponível em diversos tipo de conexão tais como: rosca, flange ou sanitária

Modelos e Dimensões

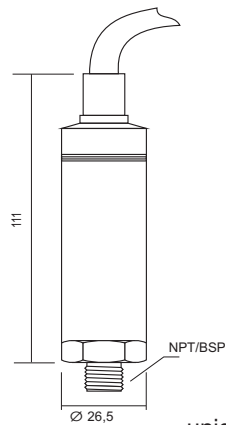
Transmissor de Pressão Modelos

SP10



unidade: mm

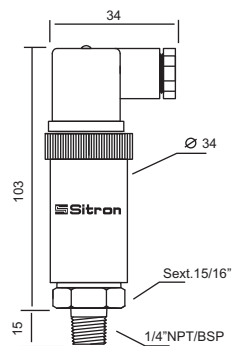
SP68



unidade: mm

SP21

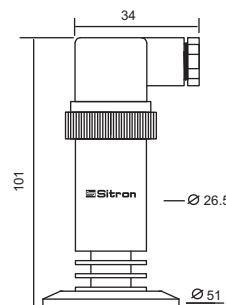
Padrão



unidade: mm

SP30

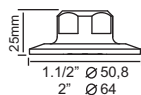
Tri-clamp de 2"



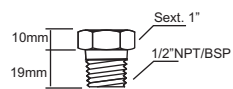
unidade: mm

Adaptador para SP21

1/4" p/ 1.1/2"
ou 2" TC



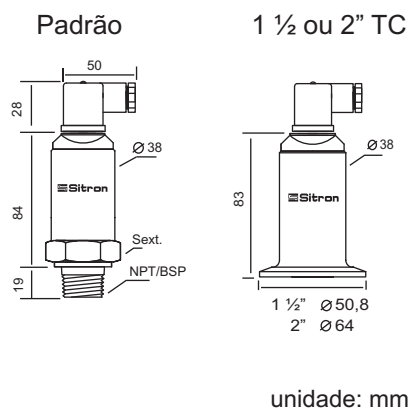
1/4" p/ 1/2"



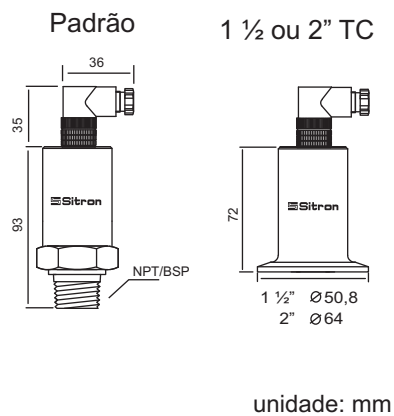
Modelos e Dimensões

SP98

Conector DIN

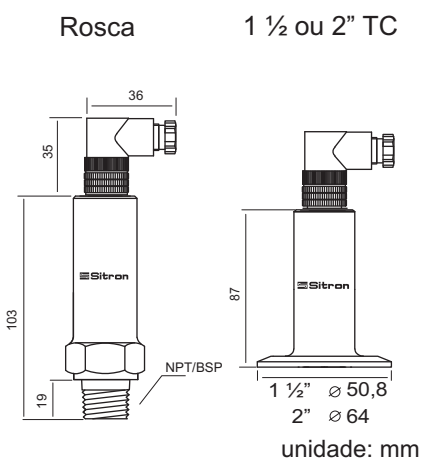


Conector M12

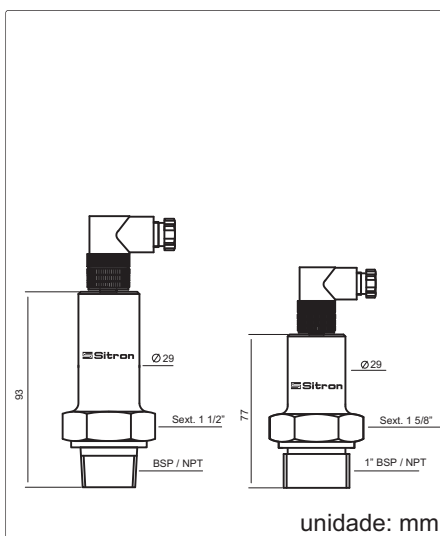


SP96

Conector M12

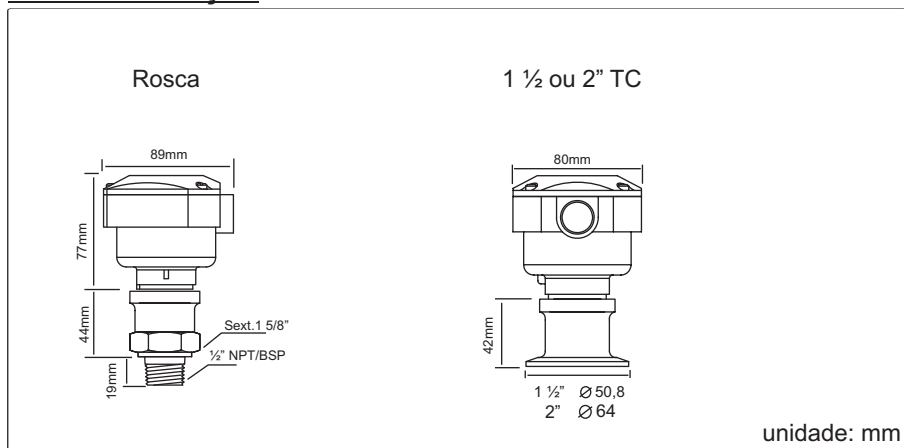


SP81

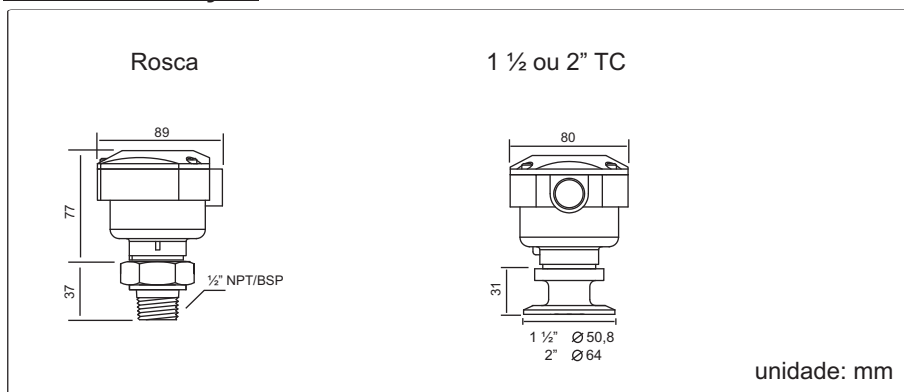


Modelos e Dimensões

SP98 com cabeçote



SP96 com Cabeçote



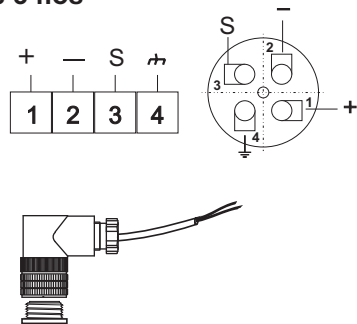
Conexões de processo

Rosca		Tri-Clamp		Flange	
				ANSI 150# ANSI 300#	
M12		1 ½"		1"	FF
3/4"		2"		1 ½"	
1"		2 ½"		2"	RE
1 ½"		3"		2 ½"	
2"					

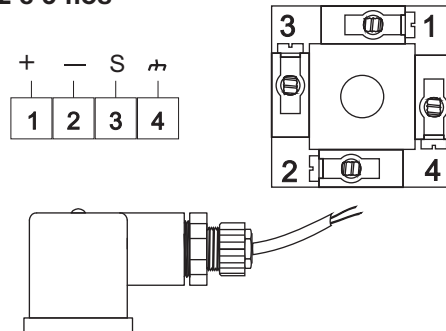
Conexões Elétricas

Transmissor de Pressão- SP série

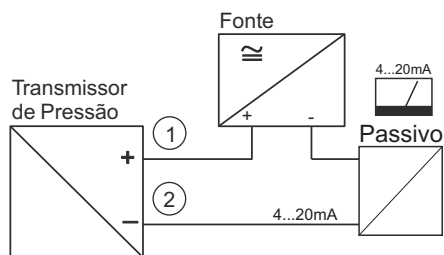
Conector M12 2 e 3 fios



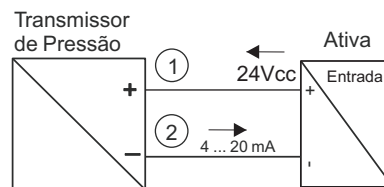
Conector DIN 43650/ 2 e 3 fios



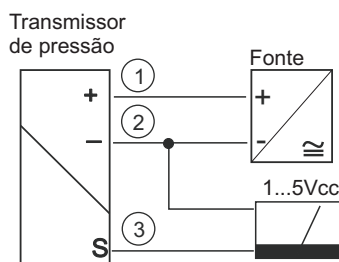
Saída 4...20mA (2 fios) Passivo



Saída 4...20mA (2 fios) Ativo

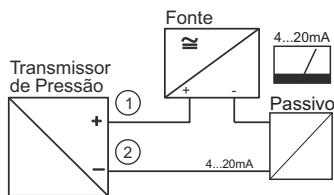


Saída 1...5Vdc (3 fios)

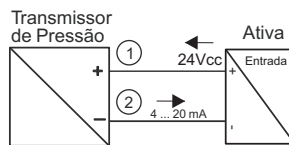


Transmissor de Pressão SP10 e 68

Saída 4...20mA (2 fios) Passivo



Saída 4...20mA (2 fios) Ativo



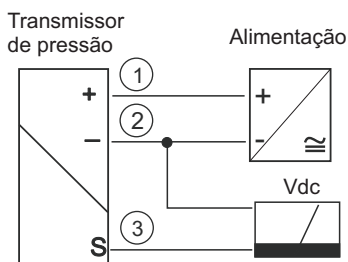
SP68

- ① Vermelho (+)
- ② Preto (-)

SP10

- ① Vermelho (+)
- ② Verde (-)

Saída: 1...5Vcc



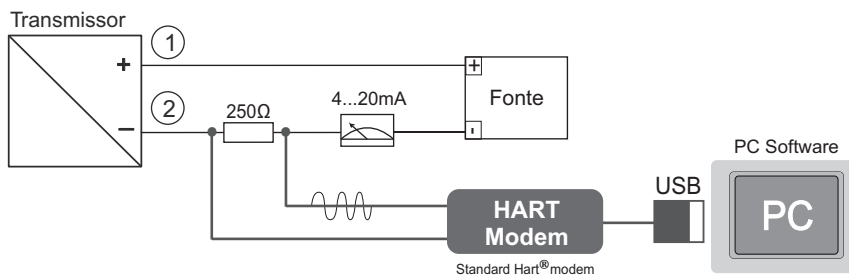
SP10

- ① Vermelho (+)
- ② Verde (-)
- ③ Amarelo (saída) 3 fios

SP68

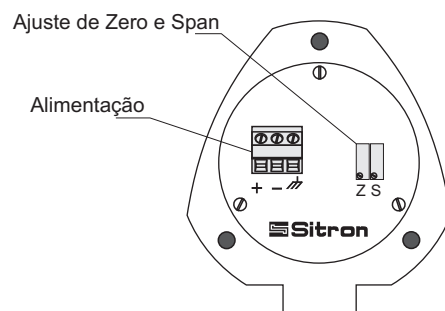
- ① Vermelho (+)
- ② Preto (-)
- ③ Amarelo (saída) 3 fios

HART Modem conexão



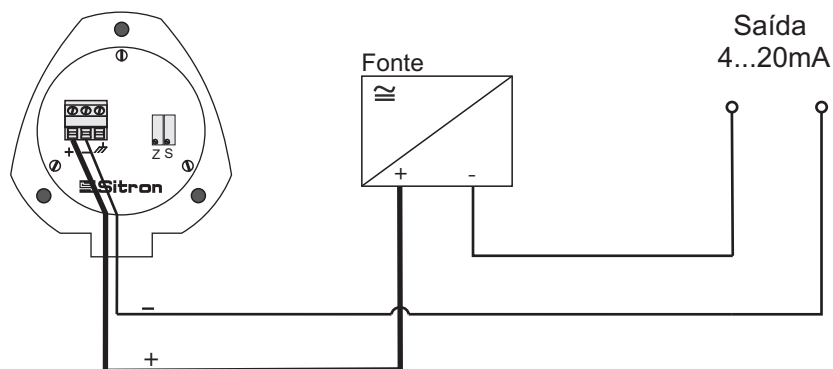
Conexões Elétricas

Transmissor de Pressão SP96Z / 98Z

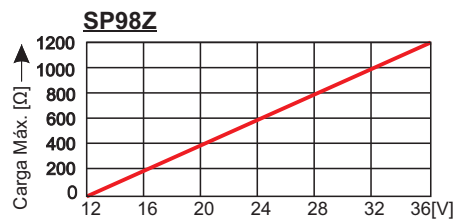
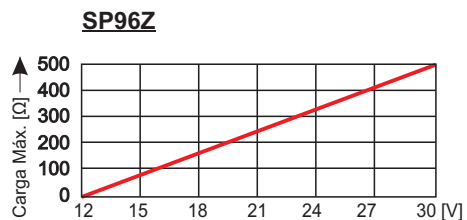


Transmissor de Pressão SP96Z / 98Z

Saída 4...20mA (2fios)



Impedância de Carga



Pré Instalação

1) Se necessário use fita PTFE ou o-rings para vedar o sistema .

Transmissores com prensa cabo:

Deve apertar até sentir a devida pressão, evite deixar frouxo para que o cabo não fique escorregando e infiltre pelo mesmo.

Encaixe a tampa e rosqueie os parafusos, não deixe o mesmo aberto (somente quando for calibrar) para evitar infiltração.

2) Antes de instalar, confira se as conexões dos cabos estão corretas e se a tensão da rede é compatível com as especificações do equipamento.

Utilize cabos de confiança e que sejam blindados, evitando assim interferências magnéticas.

Mantenha equipamentos de RF (rádio frequência) longe do transmissor para evitar mau funcionamento. Se for inevitável, faça uma proteção ou caixa metálica em volta do transmissor e que esteja aterrada (em caso de dúvidas, consulte nossa assistência técnica).

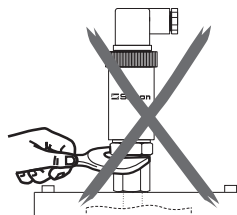
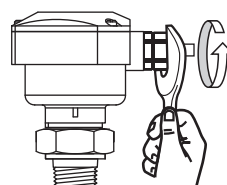
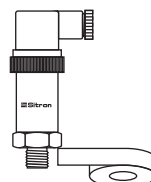
4) Cuidados devem ser tomados para evitar deformidades na membrana. Também deve-se tomar cuidado para não tocar ou encostar com qualquer tipo de objeto na membrana do sensor durante a instalação. Qualquer dano prejudicará o funcionamento do mesmo.

5) Proteja o transmissor contra chuva e não o exponha ao calor excessivo. Respeite a temperatura de trabalho e o grau de proteção especificados para o uso.

6) Antes da instalação, por motivo de segurança, verifique se o tanque ou tubulação encontra-se sem produto e sem pressão.

7) Para transmissores com selagem:

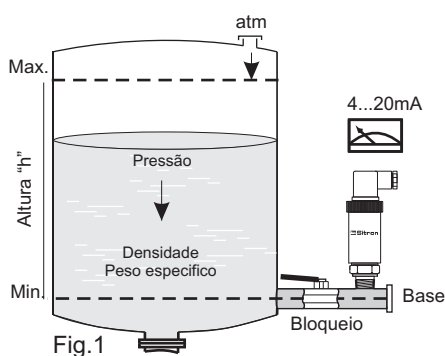
Em hipótese alguma deve ser retirada a selagem dos transmissores. Evite flexionar a membrana com as mãos e mantenha-a protegida até a instalação.



Instalação

Pressão de Coluna de Líquido

Coluna de água	Sistema MKgfs	Sistema MKS
$P(\text{mH}_2\text{O}) = \text{densidade relativa} \cdot h(\text{m})$	$P(\text{Kg/m}^2) = \text{Peso específico}(\text{Kg/m}^3) \cdot h(\text{m})$	$P(\text{KPa}) = \text{densidade}(\text{Kg/m}^3) \cdot g(\text{m/s}) \cdot h(\text{m})$



Princípio de medição

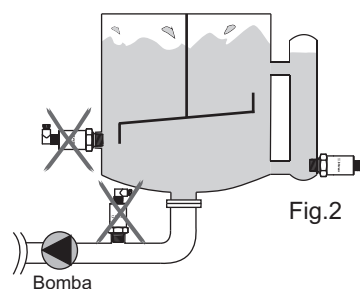
O peso da coluna de líquido gera uma pressão hidrostática. Com a densidade do produto constante e a medida que a coluna de líquido vai aumentando (h) a pressão exercida no transmissor irá aumentar.

Os transmissores podem ser instalados em qualquer posição.

Para medição de nível a instalação deve ser feita na base do tanque ou ponto mínimo de medição (fig.1) a referência de medição será a posição em que o transmissor será instalado e não o fundo do tanque.

Para medição de pressão o mesmo pode ser instalado em qualquer ponto da tubulação ou tanque vedado. É aconselhável instalar uma válvula de bloqueio entre o transmissor e a conexão para fazer manutenção, sem que seja preciso parar o processo.

Evite instalar na saída do tanque ou perto de agitador onde há pulsos de pressão evitando assim variações bruscas no sinal. Para este caso é necessário o uso de tubo acalmador (*Still tube*) para amortecer a superfícies do líquido (Fig. 2).



Em situações onde o tanque está suspenso, o transmissor deve sempre ser instalado em um ponto abaixo da conexão utilizando o sistema de selagem com capilar, este tipo de instalação é necessária quando se deseja ter o transmissor mais próximo para melhor visualização (Fig. 3).

Nota: Avalie o tipo de produto a ser medido no processo, produtos agressivos podem danificar a membrana de aço-inox do elemento sensor por isso, faz-se necessário o sistema de selagem, para evitar que o mesmo não tenha contato com o produto corrosivo a ser medido (Fig. 4).

Instale o transmissor de forma que o cabo de alimentação faça um "U" para que a água possa escoar sem risco de infiltrar no transmissor (Fig. 5).

Utilize cabo com respiro para todos os modelos de transmissores Sitron para não prejudicar a linearidade e funcionamento (este cabo especial também pode ser fornecido pela sitron) (Fig. 7).

Evite instalar o transmissor embaixo de tanques que ocorra escoamento ou respingos se for inevitável faça uma proteção evitando assim que o produto que cai infiltre no transmissor. Faça o mesmo procedimento quando a instalação é em ambiente aberto, variações na temperatura pode criar condensação interna por isso, evite expor diretamente o transmissor ao sol e chuva

Fig. 3

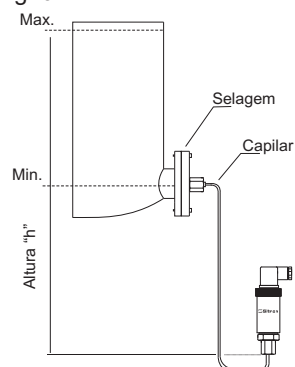


Fig. 4

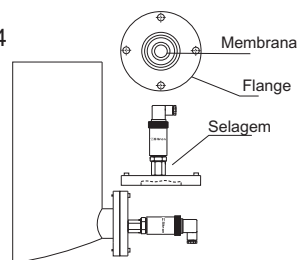


Fig. 5

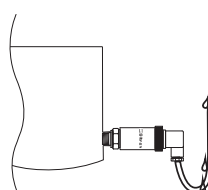
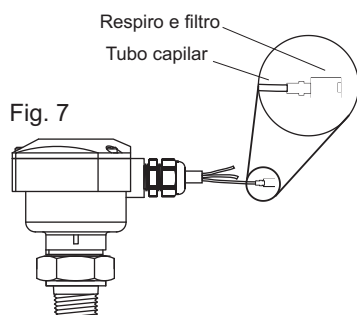
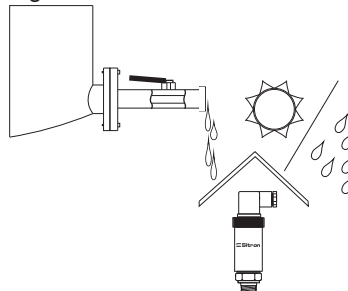


Fig. 6



Calibração

Calibração SP96Z e 98Z

Para a calibração do SP96Z/98Z primeiramente o processo deve estar livre de pressão ou produto.

Verifique se o multímetro está ligado corretamente, em série com a fonte e o instrumento, na escala de mA (miliampere).

Com o processo livre, ajuste a corrente medida para 4mA no *trimpot* de ajuste de “zero”, lembrando que o giro no sentido horário aumenta o valor da corrente e anti-horário diminui o valor de corrente (Fig. 1).

Após o ajuste de 4mA (zero) coloca-se a pressão ou nível do processo ao máximo desejado, regulando-se o sinal de 20mA (span) no *trimpot* de span (fig. 2).

Ao final da calibração, recomenda-se repetir o procedimento, com o objetivo de confirmá-la e realizar o ajuste final, caso necessário.

Lembramos que todos os transmissores de pressão são pré-calibrados em fábrica, com base nas informações enviadas pelo cliente.

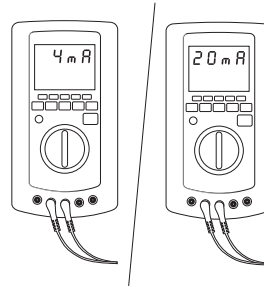


Fig.1

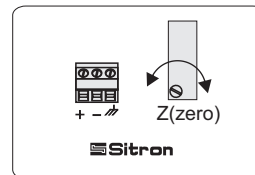
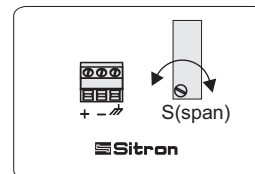


Fig.2



Não movimente pelo cabeçote quando for rosquear o transmissor na conexão de processo (Fig. 1).

Ao apertar o transmissor use a chave adequada. Aperte até conseguir selar; evite segurar no cabeçote e não use o mesmo para rosquear (Fig. 2).

O transmissor não pode sofrer nenhum impacto ou queda pois pode danificar o elemento sensor e a eletrônica (Fig. 3).

Não inserir chave de fenda ou outra ferramenta na entrada de pressão do transmissor para não danificar a membrana do mesmo.

Conexão Elétrica com Conector DIN :

A figura 4 mostra os passos para a montagem adequada do conector. Nas partes onde necessitam ser rosqueada aperte até sentir uma média pressão na borracha de vedação (não tente apertar até chegar ao final da rosca para não espanar. É de extrema importância que o conector seja bem vedado para que o grau de proteção seja respeitado e não ocorra infiltração.

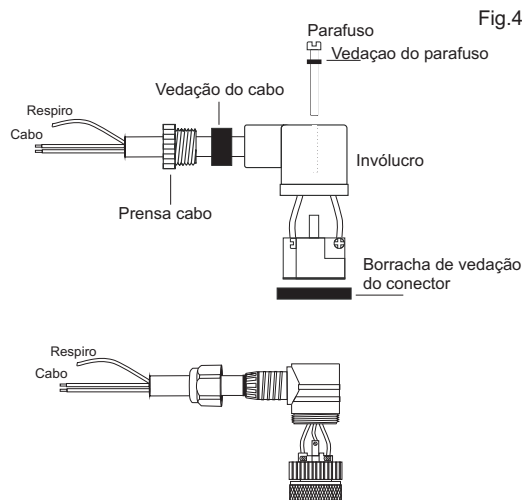


Fig. 1



Fig. 2

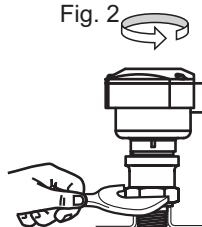
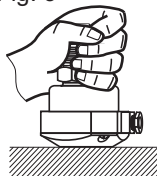
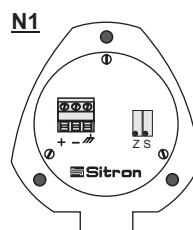
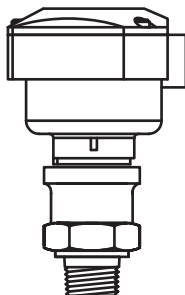


Fig. 3



Especificações Técnicas

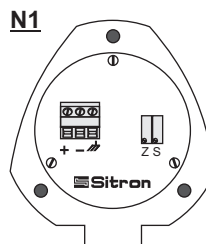
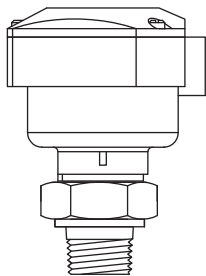
SP98Z



Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vdc
Consumo	22mA max.
Saída	4...20mA (2 fios)
Precisão / Estabilidade	+/- 0,5%
Ajuste	Zero e Span
Tipo de Sensor	Sensor Capacitivo Cerâmico
Faixas de medição	-1 a 40 Bar
Conexão elétrica	Prensa Cabo 1/2"NPT
Conexão ao processo	1/2" a 1 1/2 BSP ou NPT - flange ou sanitária
Cabeçote	N1 Nylon com fiberglass
Material do corpo	Aço Inox 316
Temperatura de trabalho	-10 a +80°C
Sobre pressão	3 x F.S.
Classe de proteção	IP 65

Especificações Técnicas

SP96Z



Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vcc
Consumo	22mA máx.
Saída	4...20mA (2 fios)
Precisão / Estabilidade	+/- 0,5%
Ajuste	Zero e Span
Tipo de Sensor	Sensor Piezoresistivo em Aço Inox 316.
Faixas de medição	-1 a 200 Bar
Conexão elétrica	Prensa cabo 1/2"NPT
Conexão ao processo	1/2" a 1 1/2 BSP ou NPT - flange ou sanitária
Cabeçote	N1 Nylon com fiberglass
Material do corpo	Aço Inox 316
Temperatura de trabalho/ Compensada	-10 a +80°C / -10...+70°C (Padrão), 0...+60°C (< 1 Bar)
Zero e Span Coeficiente	0,02% F.S./°C (> 1 Bar) / 0,04% F.S./°C <1 Bar)
Sobre pressão	3 x F.S.
Classe de proteção	IP 65

Especificações Técnicas

SP68

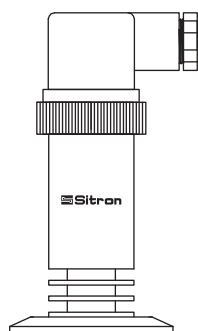


- ① Vermelho (+)
- ② Preto (-)
- ③ Amarelo (saída) 3 fios

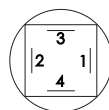
Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vdc
Consumo	22mA max.
Proteção	Inversão de polaridade
Saída	4...20mA (2 fios) / ,1...5V, 0...5V (3 fios) sob pedido
Precisão / Estabilidade	+/- 0,5%
Tipo de Sensor	Sensor em Aço Inox 316 c/ enchimento em silicone
Faixas de medição	0,1 a 1000 Bar
Conexão elétrica	Cabo Polietileno com 2 ou 3 fios
Conexão ao processo	M20*1.5" / 1/2"(BSP ou NPT) (outros)
Material do corpo	Aço Inox 304
Temperatura de trabalho / Compensada	-10° a + 85°C / -10 a +80°C
Zero / Span Coeficiente	±0.03%F.S./°C
Sobre pressão	3 x F.S.
Classe de proteção	IP 68

Especificações Técnicas

SP30



Conector DIN 43650



1 (+) positivo

2 (-) negativo

3 Saída (V)

4 (⏏) GND

Aplicação	Medição de pressão e nível em processos Sanitários
Alimentação	12...30Vcc
Consumo	22mA máx.
Saída	4...20mA (2 fios)
Proteção	Inversão de polaridade
Precisão / Estabilidade	+/- 0,5%
Tipo de Sensor	Sensor piezoresistivo em Aço Inox 316 c/ enchimento em silicone ou óleo de oliva
Faixa de medição	0,1 a 1000 Bar
Conexão elétrica	Conector DIN43650 ou Conector M12
Conexão ao processo	M20*1.5 , 1/2" BSP ou 2"TC
Material do corpo	Aço Inox 304
Temperatura de trabalho	-10 a +70°C (Padrão compensada) -10° a + 90°C (compensada sob pedido)
Zero / Span Coeficiente	1,5% F.S (-10...70°C)
Sobre pressão	3 x F.S.
Classe de proteção	IP 65

Especificações Técnicas

SP10

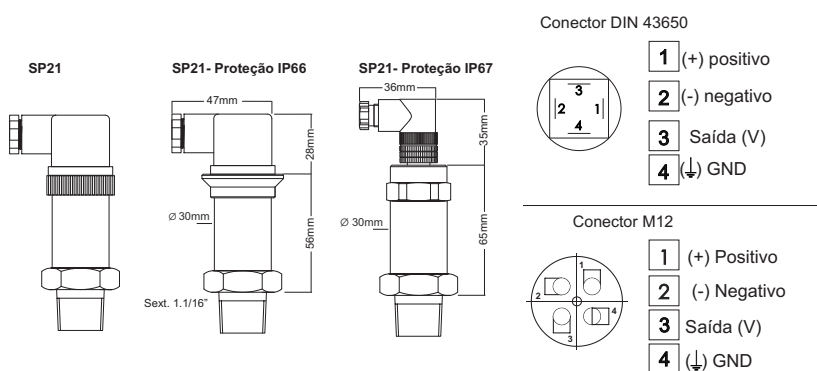


- ① Vermelho (+)
- ② Verde (-)
- ③ Amarelo (saída) 3 fios

Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vdc
Consumo	22mA max.
Proteção	Inversão de polaridade
Saída	4...20mA (2 fios) / 0...5 ou 1...5V (3 fios)
Precisão / Estabilidade	+/- 0,5%
Tipo de Sensor	Sensor piezoresistivo em Aço Inox 316 c/ enchimento em silicone.
Faixas de medição	0,2 a 250 Bar
Conexão elétrica	Cabo com 2 ou 3 fios e Conector M12 (outros)
Conexão ao processo	G1/4" / 1/4"-18 NPT / 1/8"-27 NPT / M14*1.5 / M12*1.5 / 1/4"-19 PT / 7/16"-20 UNF (femea)
Material do corpo	Aço Inox 304
Temperatura de trabalho/ Compensada	-10° a + 70°C
Zero / Span Coeficiente	1,5% F.S (-10...70°C)
Sobre Pressão	3x F.S
Classe de proteção	IP 65

Especificações Técnicas

SP21

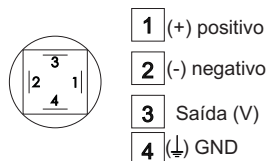


Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vdc
Consumo	22mA max.
Saída	4...20mA (2 fios) 0,5...4,5/ 1...5V/ 0...5V (3 fios) sob pedido
Proteção	Inversão de polaridade
Precisão / Estabilidade	+/- 0,25%
Tipo de Sensor	Sensor piezoresistivo em Aço Inox 316
Faixas de medição	0,1 a 1000 Bar
Conexão elétrica	Conector DIN43650 / Conector M12
Conexão ao processo	1/4" a 1 1/2" BSP ou NPT - flange ou sanitária
Material do corpo	Aço Inox 304
Temperatura de trabalho/ Compensada	-10° a + 70°C
Zero / Span Coeficiente	1,5% F.S (-10...70°C)
Sobre Pressão	3x F.S
Classe de proteção	IP 65 / IP66 / IP67

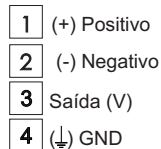
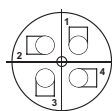
Especificações Técnicas

SP98 / SP96

Conector DIN 43650



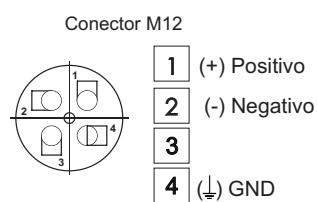
Conector M12



Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vdc
Consumo	22mA max.
Saída	4...20mA (2 fios) ou 1...5 (opcional)
Precisão / Estabilidade	+/- 0,5%
Tipo de Sensor	SP-98 Sensor Capacitivo Cerâmico SP-96 Piezoresistivo com membrana em aço-inox 316.
Faixas de medição	SP-98 (-1 a 40 Bar) SP-96 (-1 a 200 Bar)
Conexão elétrica	Conector DIN43650 ou M12
Conexão ao processo	1/2 a 1 1/2" BSP ou NPT, Flange e Sanitária
Material do corpo	Aço Inox 316
Temperatura de trabalho/ Compensada	-10 a +80°C / -10...+70°C (Padrão), 0...+60°C (< 1 Bar)
Zero e Span Coeficiente	0,02% F.S./°C (> 1 Bar) / 0,04% F.S./°C <1 Bar)
Sobre pressão	3 x F.E.
Classe de proteção	IP 65

Especificações Técnicas

SP81



Aplicação	Medição de pressão e nível p/ líquidos e gases
Alimentação	12...30Vdc
Consumo	22mA máx.
Saída	4...20mA (2 fios)
Proteção	Inversão de polaridade / Interferência eletromagnética
Precisão / Estabilidade	+/- 0,25%
Tipo de Sensor	Sensor piezoresistivo cerâmico
Faixas de medição	0...600 Bar
Conexão elétrica	Conector M12
Conexão ao processo	BSP, NPT, Flange ou Sanitária
Material do corpo	Aço Inox 316L
Temperatura de trabalho	-10° a + 80°C
Sobre pressão	3 x F.E.
Classe de proteção	IP 67

Solução de Pequenos Problemas

<u>Falha</u>	<u>Diagnóstico Técnico</u>	<u>Solução</u>
Falta de linearidade	Membrana deformada	Enviar para Assistência Técnica
	Alimentação incorreta	Verificar a tensão de alimentação
	Temperatura fora da faixa compensada	Adequar a instalação p/ temperatura de trabalho
Sinal de saída oscilando	Turbulência no processo	Verificar a instalação (Tubo acalmador)
		Verificar a calibração
Sinal de saída fixo	Membrana danificada	Enviar para Assistência Técnica
	Eletrônica com defeito	
	Infiltração	
Sem sinal de saída	Ligação incorreta	Verificar a instalação elétrica

Assistência Técnica Sitron

Entre em contato para solução de:

- dúvidas técnicas
- garantia
- assistência ou acompanhamento do conserto

Fale com nosso técnico:

Tel.: 3825-2111 - Ramal 2306

Código de Pedido

MODELO	
SP96	
SP96Z	
SP98	
SP98Z	
SP21	1 1/4"
SP68	2 3/8"
SP30	3 1/2"
SP10	4 3/4"
	5 1"
	6 1 1/2"
	7 2"
	9 3"
DIMENSÃO CONEXÃO	
CONEXÃO AO PROCESSO	
B	BSP
E	FLANGE ANSI 150# 316 SS
F	FLANGE ANSI 150# PVC
K	FLANGE ANSI 150# 346 SS
N	NPT
R	SMS Fêmea
S	SMS Macho
T	TRI-CLAMP
Y	DIN - Fêmea 316 SS
CABEÇOTE	
SC	S/ CABEÇOTE
N1	NYLON c/ FIBERGLASS Pequeno
CONEXÃO ELÉTRICA	
1	1/2" BSP
2	PC 1/2" BSP
7	PC 1/2" NPT
D	Conector DIN 43650
L	Comprimento do cabo (especificar)
Y	PC Metal M16 c/ 2m Cabo
M	Conector M12
RANGE	
R	Especificar
TIPO DE SENSOR	
0	Sem Especificação
A	Aço Inox Silicone Absoluto
B	Aço Inox Olivenol
C	Cerâmico
CP	Corpo PVC e Sensor Cerâmico
D	Aço Inox Silicone Diferencial
G	Aço Inox Silicone Relativo
H	Aço Inox Olivenol Relativo
X	Outros
OPÇÕES	
F	Faceado
P	Corpo e Conexão em PVC
PE	Corpo e Conexão em Polipropileno
ACESSÓRIOS	
0	Nenhum
I	Indicador Digital
X	Cabo
ACESSÓRIOS	
HT	Hart Talker - USB / Hart Interface

Termos e condições Sitron

Design: a Sitron se reserva no direito de fazer qualquer alteração ou mudança necessária para melhorar seus produtos, corrigir defeitos ou tornar seus produtos mais seguros, sem aviso prévio ou consentimento do comprador.

Custos: todos os valores estipulados serão em Reais (R\$) e todas as cotações serão válidas por 30 (trinta) dias a partir da data da proposta, salvo quando especificado.

Instruções de Segurança: o comprador deverá garantir que seus representantes e profissionais envolvidos observem todas as instruções técnicas e de segurança contidos nos manuais de operação, catálogos ou outras instruções (escritas ou verbais) da Sitron.

Transporte e entrega: a partir do ato de liberação (expedição) da mercadoria, é de inteira responsabilidade do cliente o transporte do produto até o destino, arcando ele com os custos de frete e outros recursos de transporte e/ou seguro.

Atrasos no transporte: a Sitron não tem controle sobre o tempo que a mercadoria poderá ser mantida na alfândega. Por esta razão, a Sitron só se compromete a uma “data de expedição” e não a uma “data de entrega”.

Entregas parciais: embora a Sitron se empenhe em fazer as entregas de seus pedidos em tempo hábil e por completo, a mesma se reserva no direito de entregar o pedido parcialmente, quando necessário.

Alterações: qualquer alteração feita pelo comprador e que afete as especificações do produto, tais como quantidade encomendada, data de entrega, método de transporte ou de embalagem, ponto de entrega, entre outros, deverá ser feito por escrito e assinado por ambas as partes.

Neste caso, a Sitron se reserva no direito para reajustar os preços e/ou entrega dos pedidos, que será acordado por ambas as partes antes de se prosseguir com os mesmos. Quaisquer desses pedidos serão cobrados de acordo com o escopo das mudanças e o andamento do pedido atual.

O cliente deverá assinar e devolver a aprovação dos desenhos juntamente com qualquer pedido. Se as aprovações não forem devolvidas juntamente com o pedido, a data de entrega poderá ser adiada até o reconhecimento dos mesmos.

Cancelamento: qualquer cancelamento de contrato por parte do comprador só será efetivo se for feito e aceito por escrito pela Sitron. Em tal caso, a Sitron reserva-se no direito de cobrar uma taxa de cancelamento razoável, incluído porém não limitado ao trabalho, material e outros gastos relacionados.

Termos e Condições

Taxas para o cancelamento:

Pedido entregue mas não liberado para fabricação	10%
Pedido em fase de produção	75%
Pedido concluído e pronto para a expedição	100%

Garantia: a Sitron oferece garantia de seus produtos contra defeitos de fabricação, quando for instalado em aplicações aprovadas pela Sitron, por um período de 1 (um) ano a contar da data de expedição, exceto quando especificado por escrito pela Sitron.

A Sitron não se responsabiliza por danos causados em seus produtos ou outros equipamentos causados por instalação inadequada ou má aplicação por parte do comprador. A instalação e a inicialização do equipamento devem ser cumpridas de acordo com as orientações no manual de instalação, diagrama elétrico, etc., ou realizada diretamente com supervisão de um técnico da Sitron ou representante de vendas autorizado, para ser coberto pela garantia Sitron.

A Sitron não se responsabiliza por defeitos devido à desgaste, dano intencional, negligência, condições normais de trabalho, alteração ou tentativa em fazer manutenção dos equipamentos sem aprovação da Sitron.

O comprador deve disponibilizar todos os recursos e pessoal para ajudar a Sitron a diagnosticar o defeito sem custo adicional. Na falta de cooperação por parte do comprador, a este respeito, não será cobrado o cumprimento da garantia acima.

Devolução de mercadoria: nenhum produto pode ser devolvido sem autorização da Sitron e sem um número ADM. A Sitron não se responsabiliza por mercadorias devolvidas sem autorização. Na emissão de créditos para essas remessas, a Sitron se reserva no direito de cobrar uma taxa para reposição de estoque dependendo da possibilidade de se recondicionar e revender os equipamentos devolvidos.

Informação confidencial: todos os desenhos, especificações e informações técnicas fornecidas pelo comprador ou pela Sitron, deverão ser tratadas como confidenciais, não serão divulgadas, exceto havendo necessidade de uma das partes, para fins de cumprimento de contrato. O comprador concorda que os desenhos e/ou matérias relacionadas são e permanecem como propriedades exclusivas da Sitron; o comprador não terá o direito a esta propriedade, quer seja em parte ou por completo.

Erros: a Sitron se reserva no direito de corrigir todas e qualquer tipografia ou erros escritos ou omissões em seus preços ou especificações.



rev_08_2016

Sitron - Equipamentos Eletrônicos Ltda.
Rua Baronesa de Itú, 81/83 - São Paulo - Brasil
Fone: 5511 3825-2111 e Fax: 5511 3825-2171
Email: vendas@sitron.com
www.sitron.com