

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

Douglas da Silveira de Lima

**Avaliação dos Índices de Cavitação a Jusante de Comportas
Segmento Invertida em Conduitos Retangulares**

Porto Alegre
dezembro 2019

Douglas da Silveira de Lima

**Avaliação dos Índices de Cavitação a Jusante de Comportas
Segmento Invertida em Conduitos Retangulares**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Mauricio Dai Prá
Coorientadora: Priscila dos Santos Priebe

Porto Alegre
dezembro 2019

Douglas da Silveira de Lima

**Avaliação dos Índices de Cavitação a Jusante de Comportas
Segmento Invertida em Conduitos Retangulares**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mauricio Dai Prá (UFRGS)
Dr. pela UFRGS/Porto Alegre
Orientador

Eng. Priscila dos Santos Priebe
Me. pela UFPel/Pelotas
Coorientadora

Prof. Luiz Augusto Magalhães Endres (UFRGS)
Dr. pela UFRGS/Porto Alegre

Eng. Aline Saupe Abreu
Me. pela UFPel/Pelotas

Dedico este trabalho aos meus pais e minha irmã que sempre me apoiaram durante minha graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, professor Mauricio Dai Prá, pelo direcionamento e orientação do presente trabalho.

Agradeço à engenheira Priscila Priebe, pela disponibilidade e por todo o auxílio fornecido durante a elaboração do trabalho.

Agradeço aos meus pais e minha irmã, por todo o apoio fornecido durante a minha graduação.

Agradeço aos amigos, pelos churrascos, conversas e momentos de descontração.

Agradeço à UFRGS e à UFPEL, pelo fornecimento dos dados e ensaios que tornaram possível a elaboração deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que me apoiaram de alguma forma (não cito nomes para que ninguém seja esquecido), e pela presença de todas as pessoas acima citadas, que tornaram possível a conclusão desta etapa.

Não diga pouco em muitas palavras, mas diga muito em poucas palavras.

Pitágoras

RESUMO

A utilização de comportas ou válvulas para controlar a vazão em estruturas hidráulicas é bastante comum, no entanto sua operação deve ser realizada com grande cautela, em virtude da ocorrência de escoamentos turbulentos a jusante destes dispositivos de controle, os quais produzem esforços hidrodinâmicos intensos que podem ser prejudiciais e causar danos à estrutura dos condutos ou causar danos na própria comporta. O escoamento, nestes casos, pode vir a ter velocidades elevadas e pressões instáveis em alguns trechos e, conseqüentemente, maior probabilidade de comprometer a estrutura dos condutos por diversos fenômenos físicos. Para realizar o descarregamento de fundo de barragens, enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação e quaisquer situações que pressuponham o controle de vazão é necessária a utilização desses dispositivos de controle de vazão, podendo ocorrer problemas de cavitação junto a eles. Este trabalho procura avaliar os índices de cavitação a jusante de comportas tipo segmento invertida em condutos retangulares, sistema muito utilizado em enchimento e esvaziamento de eclusas de navegação. Inicialmente é realizada uma pesquisa bibliográfica apresentando as principais estruturas onde pode ser utilizada, seu funcionamento e importância, posteriormente apresentada a pesquisa bibliográfica sobre os índices de cavitação críticos para diferentes tipos de estruturas, seguido por medidas mitigadoras de danos e por fim aplicação do método proposto por Sell (2018) para prever pontos de operação críticos através da utilização de modelos reduzidos. Os dados obtidos através dos ensaios em dois modelos reduzidos foram analisados em escala de protótipo, a partir da análise dos dados e da aplicação dos índices de cavitação críticos foi possível estimar adimensionais de posição e operação, obtendo-se resultados satisfatórios, quando comparados os resultados obtidos para os dois modelos reduzidos estudados. Os resultados são de possível aplicação em futuros dimensionamentos em que há risco de cavitação a jusante da comporta, prevenindo o fenômeno (evitando superar a vazão crítica), ou estimando até onde há possibilidade de dano a jusante da comporta para uma dada vazão e abertura da comporta.

Palavras-chave: Esforços hidrodinâmicos. Comporta segmento invertida.

Índices de Cavitação. Dimensionamentos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Descarregadores de fundo instalados na represa Cerro del Águila.....	19
Figura 2 – Parâmetros de eficiência Energética, consumo de Combustível e emissões por modal	20
Figura 3 – Etapas de desenvolvimento	24
Figura 4 – Tipos de comporta.....	26
Figura 5 – Determinação da veia contraída em uma comporta segmento invertida, ensaio com corante	27
Figura 6 – Coeficiente de contração em comporta segmento invertida para diversos autores.	28
Figura 7 – escoamento livre a jusante de uma comporta	28
Figura 8 - Classificação dos tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos	31
Figura 9 - Forças de downpull e uplift para comporta segmento invertida	33
Figura 10 – Fator de cavitação em função da velocidade específica segundo Wislicenus e Widdern	38
Figura 11 – Tipos de cavitação em hélices.....	40
Figura 12 – Zonas de operação.....	41
Figura 13 – Tipos de blocos dispersores e de amortecimento (dimensões em mm). Parâmetros de cavitação críticos e zonas de erosão	43
Figura 14 – Blocos dissipadores de energia após ocorrência de cavitação	44
Figura 15 – Vertedouro da barragem de Pedrogão.....	45
Figura 16 – Vertedouro da barragem de Itaipu Binacional	45
Figura 17 - Barragem de Glen Canyon, túnel do vertedouro esquerdo, setembro de 1983, buraco com 11 metros de profundidade	45
Figura 18 – Índice de cavitação incipiente para ranhura retangular.....	46
Figura 19 – Comporta segmento (posição regular)	47
Figura 20 – Comporta segmento invertida	47
Figura 21 – Índices de cavitação limites para comporta segmento invertida.....	48
Figura 22 – Comporta segmento invertida - UFPel	51
Figura 23 – Comporta segmento invertida – LOH.....	51
Figura 24 – Esquema do modelo reduzido LOH.....	52
Figura 25 – Esquema do modelo reduzido UFPel.....	53
Figura 26 – Disposição das tomadas de pressão na base do conduto, medidas em cm, UFPel	54
Figura 27 – Transdutores de pressão instalados na base do conduto, UFPel	55
Figura 28 – Determinação da pressão de vapor.....	60
Figura 29 – Determinação da pressão atmosférica.....	60

Figura 30 – Determinação do comprimento limite.....	61
Figura 31 – Coeficiente de perda de carga singular por abertura.....	63
Figura 32 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 22.56 m ³ /s para pressões P _{méd}	64
Figura 33 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 32.89 m ³ /s para pressões P _{méd}	64
Figura 34 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 41.04 m ³ /s para pressões P _{méd}	65
Figura 35 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	65
Figura 36 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	65
Figura 37 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P _{méd}	65
Figura 38 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	65
Figura 39 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P _{méd}	65
Figura 40 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	66
Figura 41 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P _{méd}	66
Figura 42 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	66
Figura 43 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P _{méd}	66
Figura 44 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	66
Figura 45 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P _{méd}	66
Figura 46 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P _{méd}	67
Figura 47 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P _{méd}	67
Figura 48 – Índices de cavitação UFPel, determinação da vazão crítica	68
Figura 49 – Índices de cavitação LOH, determinação da vazão crítica	68
Figura 50 – Adimensionais calculados	70
Figura 51 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 22.56 m ³ /s para pressões P _{1%}	71

Figura 52 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 32.89 m ³ /s para pressões P1%	71
Figura 53 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 41.04 m ³ /s para pressões P1%	71
Figura 54 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	71
Figura 55 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	71
Figura 56 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P1%	71
Figura 57 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	72
Figura 58 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P1%	72
Figura 59 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	72
Figura 60 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P1%	72
Figura 61 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	72
Figura 62 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P1%	72
Figura 63 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	73
Figura 64 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P1%	73
Figura 65 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P1%	73
Figura 66 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P1%	73
Figura 67 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 22.56 m ³ /s para pressões P0.1%	74
Figura 68 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 32.89 m ³ /s para pressões P0.1%	74
Figura 69 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 41.04 m ³ /s para pressões P0.1%	74
Figura 70 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%	74
Figura 71 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%	75

Figura 72 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P0.1%.....	75
Figura 73 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%.....	75
Figura 74 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P0.1%.....	75
Figura 75 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%.....	75
Figura 76 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P0.1%.....	75
Figura 77 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%.....	76
Figura 78 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P0.1%.....	76
Figura 79 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%.....	76
Figura 80 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P0.1%.....	76
Figura 81 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 61.42 m ³ /s para pressões P0.1%.....	76
Figura 82 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 81.80 m ³ /s para pressões P0.1%.....	76
Figura 83 – Adimensional calculado para P1%.....	80
Figura 84 – Adimensional calculado para P0.1%.....	80
Figura 85 – Adimensionais para diferentes probabilidades.....	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Vazões ensaiadas no modelo reduzido LOH	53
Tabela 2 – Vazões ensaiadas no modelo reduzido UFPel	54
Tabela 3 – Faixa de operação dos transdutores de pressão da base do conduto UFPel	56
Tabela 4 – Faixa de operação dos transdutores de pressão da base do conduto LOH	56
Tabela 5 – Relações de transposição por parâmetro hidráulico	58
Tabela 6 – Vazões semelhantes ensaiadas, e vazão considerada	59
Tabela 7 – Vazões críticas em protótipo	69
Tabela 8 – Valores de comprimento limite obtidos para a abertura de 10%	77
Tabela 9 – Valores de comprimento limite obtidos para a abertura de 20%	78
Tabela 10 – Valores de comprimento limite obtidos para a abertura de 30%	78
Tabela 11 – Valores de comprimento limite obtidos para a abertura de 40%	78
Tabela 12 – Valores de comprimento limite obtidos para a abertura de 50%	79
Tabela 13 – Valores de comprimento limite obtidos para a abertura de 60%	79

LISTA DE SÍMBOLOS

a - Altura da água na abertura da comporta (m)

C_c - Coeficiente de Contração (adimensional)

C_d - Coeficiente de Descarga (adimensional)

D - Diâmetro da hélice (m)

Fr - Número de Froude (adimensional)

g - Aceleração da gravidade (m/s²)

h - Altura da água acima do bloco (m)

h_f - Perda de carga (m.c.a.)

h_p - Perda de carga singular (m.c.a.)

H - Carga ou altura de água na sucção (m.c.a.)

H_m - Altura efetiva da bomba, manométrica (m.c.a.)

H_a - Altura correspondente à pressão atmosférica local (m.c.a.)

H_s - Altura de sucção das bombas (m.c.a.)

H_v - Altura devido à pressão de vapor de água (m.c.a.)

J - Coeficiente de avanço (adimensional)

K_s - Coeficiente de perda de carga singular (adimensional)

l - Largura do aqueduto (m)

n - Velocidade de rotação (r.p.s.)

n_q - Rotação específica (r.p.m.)

n_s - Velocidade específica (r.p.m.)

v_a - Velocidade axial (m/s)

V - Velocidade média no conduto a montante da comporta (m/s)

V_a - Velocidade de avanço (m/s)

V_{ca} - Velocidade característica, na seção correspondente à primeira altura conjugada (m/s)

V_r - Velocidade num dado ponto de referência (m/s)

V_v - Velocidade na veia contraída (m/s)

Q - Vazão (m³/s)

P - Pressão na veia contraída logo a jusante da comporta (m.c.a.)

P_a - Pressão atmosférica (m.c.a.)

P_r - Pressão absoluta num ponto do sistema, fora da zona de cavitação (m.c.a.)

P_v - Pressão de vapor (m.c.a.)

P_0 - Pressão de referência (m.c.a.)

$P_{méd}$ - Pressão média (m.c.a.)

$P_{1\%}$ - Pressão com probabilidade de não excedência de 1% (m.c.a.)

$P_{0.1\%}$ - Pressão com probabilidade de não excedência de 0.1% (m.c.a.)

x - Posição em relação à borda da comporta (m)

x_{limite} - Trecho até onde há risco de cavitação (m)

Y_{vc} - Altura da água na veia contraída (m)

Y_1 - Altura da água a montante da comporta (m)

σ - Índice de cavitação (adimensional)

ν - Coeficiente de viscosidade cinemático (m²/s)

$\Pi_{operação}$ - Adimensional de operação (adimensional)

$\Pi_{posição}$ - Adimensional de posição (adimensional)

α - Abertura da comporta (%)

ρ - Massa específica (kg/m³)

γ - Peso específico (N/m³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 DIRETRIZES DE PESQUISA	22
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA	22
2.2 OBJETIVO DO TRABALHO	22
2.2.1 Objetivo Principal	22
2.2.2 Objetivo Secundário	22
2.3 PRESSUPOSTO	23
2.4 PREMISA	23
2.5 DELIMITAÇÕES	23
2.6 LIMITAÇÕES	23
2.7 DELINEAMENTO	23
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
3.1 COMPORTAS HIDRÁULICAS	25
3.2 ESCOAMENTO A JUSANTE DE COMPORTAS	27
3.3 CAVITAÇÃO	34
3.3.1 Cavitação em Diferentes Estruturas e Equipamentos Hidromecânicos	35
3.3.1.1 Cavitação em Bombas Hidráulicas	35
3.3.1.2 Cavitação em Hélices	38
3.3.1.3 Cavitação em Blocos Dissipadores de Energia e de Queda	41
3.3.1.4 Cavitação em Vertedouros	44
3.3.2 Cavitação em Comportas Segmento Invertida	46
3.4 PRESSÕES A JUSANTE DE COMPORTAS SEGMENTO INVERTIDA	48
4 METODOLOGIA	51
4.1 CONDIÇÕES DE ENSAIO	52
4.1.1 Modelo Reduzido LOH	52
4.1.2 Modelo Reduzido UFPel	53
4.2 MEDIÇÕES DE PRESSÃO	54
4.3 MEDIÇÕES DE VAZÃO	57
4.4 ESCALAS DE TRANSPOSIÇÃO	57
4.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CAVITAÇÃO	60
4.6 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO LIMITE	61
4.7 PARÂMETRO ADIMENSIONAL UTILIZADO	62
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	63

5.1 COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA SINGULAR	63
5.2 PRESSÕES MÉDIAS EM ESCALA DE PROTÓTIPO.....	64
5.3 VAZÃO CRÍTICA	67
5.4 PARÂMETRO ADIMENSIONAL.....	69
5.5 PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 1%	70
5.6 PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 0.1%	74
5.7 COMPRIMENTO LIMITE	77
5.8 ADIMENSIONAL PARA DIFERENTES PROBABILIDADES	79
6 CONCLUSÃO.....	82
REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas muito importantes, pois fornecem água para abastecimento urbano, irrigação, geração de energia, entre outros. A construção de barragens apesar de seus inúmeros benefícios, deve ser estudada e estas devem ser, criteriosamente projetadas, construídas e operadas, com correto dimensionamento de seus diferentes componentes, aumentando assim, sua confiabilidade e segurança.

Os descarregadores de fundo são um destes componentes, e podem ser definidos como dutos instalados abaixo da superfície do reservatório próximos ao fundo e são operados por comportas ou válvulas. Dentre suas finalidades é possível citar como as mais comuns:

- a) Esvaziamento de reservatório em caso da necessidade;
- b) Retirar sedimentos acumulados nas suas proximidades, evitando ou reduzindo o assoreamento.
- c) Garantir uma vazão mínima para jusante (vazão sanitária), necessária para garantir a manutenção de ecossistemas dependentes do barramento.
- d) Dispositivo muitas vezes utilizado na fase de construção de uma barragem, permitindo desviar o curso d'água.

A figura 1 mostra os descarregadores de fundo da barragem de Cerro del Águila, construída no rio Mantaro no Peru para aproveitamento hidroelétrico. Os descarregadores são retangulares e compostos por seis condutos, sua função foi de evacuar hidrogramas de cheia durante a construção do barramento e auxiliar na eliminação de sedimentos após conclusão e operação da barragem (Sayah, 2015).

Figura 1 – Descarregadores de fundo instalados na represa Cerro del Águila

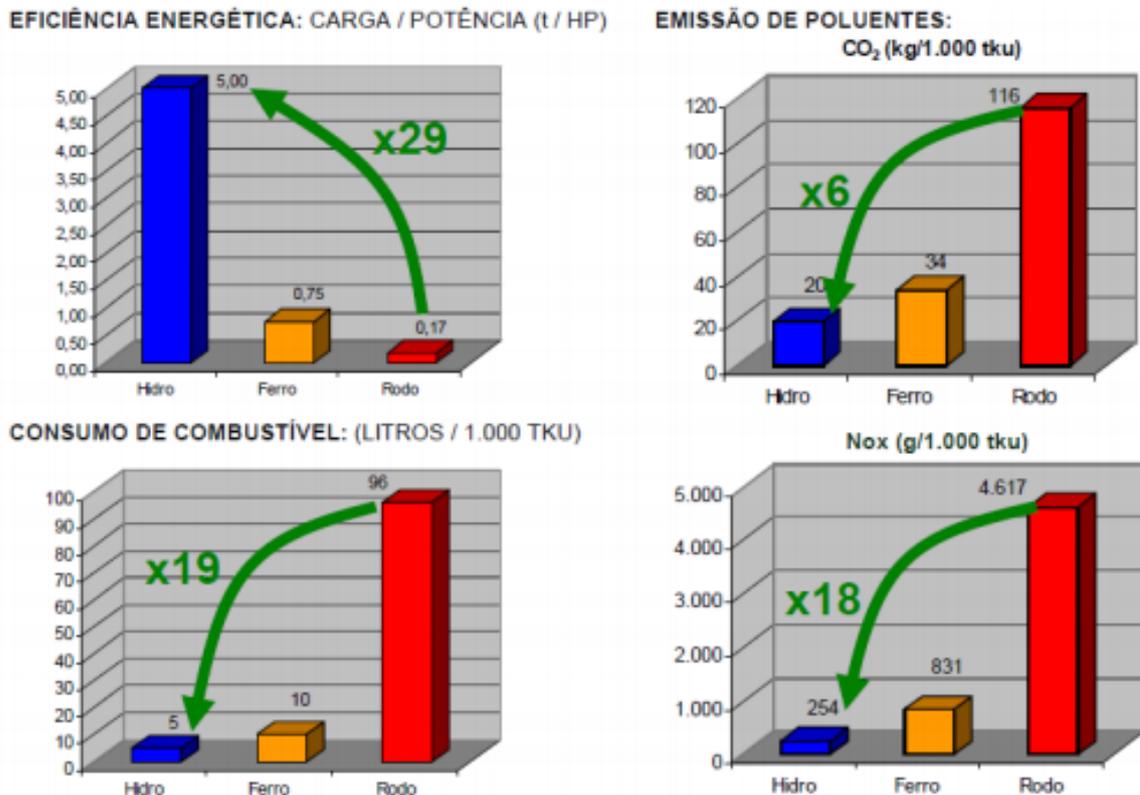


(fonte: Sayah, 2015)

Priebe (2016) explica que a operação das comportas dos descarregadores de fundo acaba favorecendo a erosão e cavitação, e exemplifica com o caso do aproveitamento hidroelétrico instalado em Cambambe, em um dos principais rios da Angola, que após 50 anos de sua construção, em uma inspeção no descarregador de fundo, foi localizado um processo de erosão por cavitação de grandes proporções a jusante de uma comporta.

A construção de usinas hidrelétricas é de grande importância econômica e são a base do setor elétrico do Brasil, porém outra área de grande importância econômica é o transporte hidroviário pois é um modal de transporte com rendimento superior aos demais comumente utilizados conforme figura 2. Além do maior rendimento por litro de combustível, o transporte hidroviário emite menos poluentes, sendo importante a coexistência entre obras hidrelétricas e a manutenção da navegabilidade dos rios.

Figura 2 – Parâmetros de eficiência energética, consumo de combustível e emissões por modal



(fonte: MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, 2010)

Sabendo que as eclusas são o meio mais comum para transposição dos desníveis das barragens, assim como nos descarregadores de fundo de barragem, seu projeto e operação são de grande importância para evitar danos em sua estrutura. Entre os maiores problemas na operação e projeto destas obras podemos citar algumas principais:

- a) Agitação d'água no interior da câmara, causando esforços e podendo ocasionar choques da embarcação contra as paredes laterais da estrutura da eclusa;
- b) Em eclusas que vencem grandes desníveis (alta queda), há ocorrência de altas velocidades no interior dos condutos de enchimento e esvaziamento da câmara, sendo possível a ocorrência do fenômeno da cavitação.

A cavitação pode ser dita como um fenômeno em que há formação de bolhas, em uma dita região do conduto, onde a pressão alcança a pressão de vapor. Essas bolhas são levadas pelo escoamento para uma região onde a pressão é maior. Neste local as bolhas implodem e causam uma onda de sobrepressão, causando danos, inicialmente no revestimento, e posteriormente na

estrutura do conduto. Esse processo é conhecido como erosão por cavitação e deve ser evitado nas obras hidráulicas.

As regiões mais propícias para ocorrência de cavitação são as curvas dos condutos e a região das comportas controladoras de vazões, sendo áreas com muita turbulência e com grande instabilidade de pressões, resultando em trechos críticos no projeto devido aos grandes riscos de erosão. Nas curvas a força centrífuga direciona o escoamento para o lado de fora do conduto, gerando uma zona de pressões baixas na parte mais interna, e essa depressão possibilita a formação das bolhas. Na região das comportas ocorrem altas velocidades logo após a abertura e em alguns casos há ocorrência de pressões baixas que iniciam o processo de cavitação.

2 DIRETRIZES DE PESQUISA

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

Com as pressões e velocidades obtidas em ensaios em modelos reduzidos, indicar se há possibilidade de ocorrência de cavitação para uma dada condição de vazão e abertura da comporta, sendo esta do tipo segmento invertida e instalada em conduto retangular.

2.2 OBJETIVO DO TRABALHO

O objetivo do trabalho será dividido em duas partes, sendo estas, principal e secundária.

2.2.1 Objetivo Principal

Com os índices de cavitação críticos para uma dada condição de abertura, obtidos em bibliografia, calcular e adimensionalizar os resultados para aplicação em estruturas de condutos retangulares operadas por comportas do tipo segmento invertida.

2.2.2 Objetivo Secundário

Análise do comportamento da distribuição longitudinal das pressões médias e com probabilidade de não excedência de 1% e 0.1%, em escala de protótipo, com os ensaios de dois modelos reduzidos.

Calcular a perda de carga nos dois modelos reduzidos e comparar com valores obtidos em bibliografia.

Identificar as vazões críticas para a operação de comportas tipo segmento invertida, na escala de protótipo.

Identificar a região com potencial de cavitação, calculando o comprimento limite, trecho até onde há risco de cavitação.

2.3 PRESSUPOSTO

O trabalho tem como pressuposto que é possível encontrar a condição de operação e a zona com risco de cavitação a partir de índices de cavitação.

2.4 PREMISSE

O trabalho tem como premissa a importância do fenômeno da cavitação, a necessidade de analisar as condições em que o mesmo ocorre e a necessidade de estudos para avaliar medidas mitigadoras de danos, aumentando a vida útil das obras hidráulicas.

2.5 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se ao estudo de condutos retangulares operado por comportas do tipo segmento invertida através de ensaios realizados em dois modelos reduzidos no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS e no Laboratório de Hidráulica e Hidroenergia – UFPel.

2.6 LIMITAÇÕES

As limitações do estudo são:

- a) as escalas dos modelos reduzidos.
- b) os ensaios foram realizados em regime permanente.
- c) as vazões máximas e mínimas ensaiadas nos modelos reduzidos, sendo estas diferentes para os dois modelos.

2.7 DELINEAMENTO

Os dados foram obtidos através dos ensaios em dois modelos reduzidos, de diferentes escalas relativas, foram medidas as pressões a jusante da comporta para diferentes aberturas da mesma. O trabalho foi dividido em cinco etapas, conforme figura 3.

Figura 3 – Etapas de desenvolvimento

- *Pesquisa Bibliográfica*

- *Obtenção de Dados*

- *Definição de Metodologia*

- *Análise de Dados*

- *Conclusões Finais*

(fonte: elaborada pelo autor)

A pesquisa bibliográfica aborda as aplicabilidades do presente estudo, apresentando as principais estruturas em que o sistema é utilizado. A pesquisa bibliográfica também aborda as principais fórmulas para obtenção do índice de cavitação, as diferentes estruturas em que pode ocorrer cavitação e medidas mitigadoras e define a metodologia a ser empregada na análise dos dados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

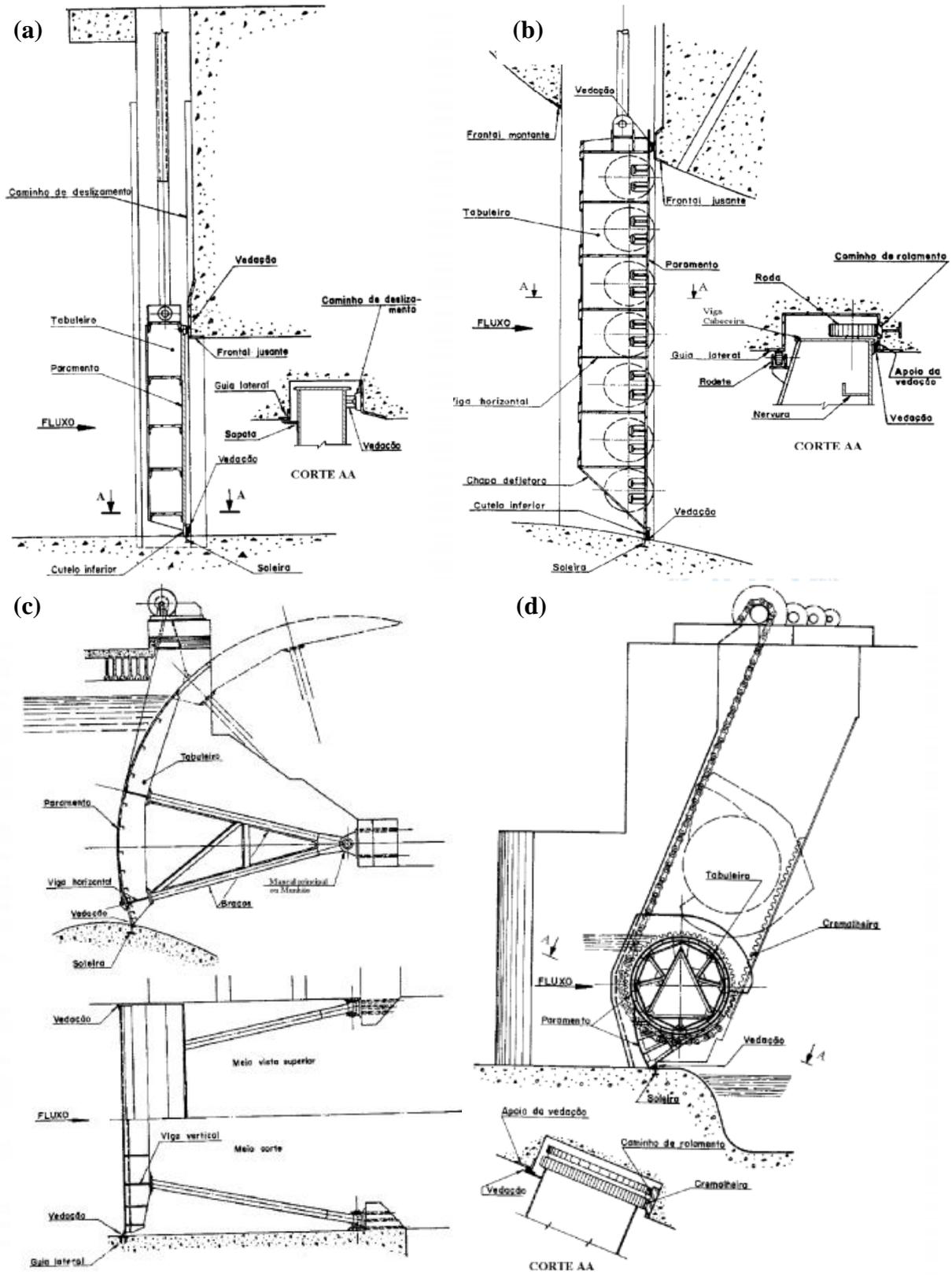
3.1 COMPORTAS HIDRÁULICAS

Comportas são muito utilizadas no campo da engenharia hidráulica, sendo utilizadas para regulação de vazões em descarregadores de fundo, em canais de irrigação, em tomadas d'água, em vertedouros e eclusas de navegação, estando sujeitas à ocorrência cavitação a jusante.

A Norma Brasileira NBR 7259/01 define os tipos de comportas quanto a sua terminologia em: gaveta, ensecadeira, vagão, lagarta, Stoney, segmento, setor, tambor, basculante, rolante, cilíndrica, mitra, telhado, visor, mista e múltipla. E também classifica as comportas quanto a sua movimentação em funcionamento, que podem ser divididas em 3 classificações, sendo que cada tipo tem movimentação em funcionamento semelhante, sendo estas:

- a) comportas de translação: aquelas que executam um movimento de translação. Podem ser do tipo de deslizamento ou do tipo de rolamento. Tipo de deslizamento (aquelas que, a estrutura principal, se movimenta em suas guias ou peças fixas, simplesmente vencendo o atrito de deslizamento entre as partes fixas e móveis) e tipo de rolamento (aquelas que, a estrutura principal, se movimenta em suas guias ou peças fixas, vencendo o atrito entre as partes fixas e móveis por meio de rodas ou rolos). Exemplos de comporta de deslizamento: Gaveta (figura 4-a) e Ensecadeira. Exemplos de comportas de rolamento: Vagão (figura 4-b), Lagarta e Stoney.
- b) comportas de rotação: aquelas que executam um movimento de rotação em torno de um eixo fixo. Exemplos de comportas de rotação: Segmento (figura 4-c), Setor, Tambor, Basculante, Mitra, Telhado, Visor.
- c) comportas de translo-rotação: aquelas que executam um movimento de translação e rotação. Exemplos de comportas de translo-rotação: Rolante (4-d).

Figura 4 – Tipos de comporta



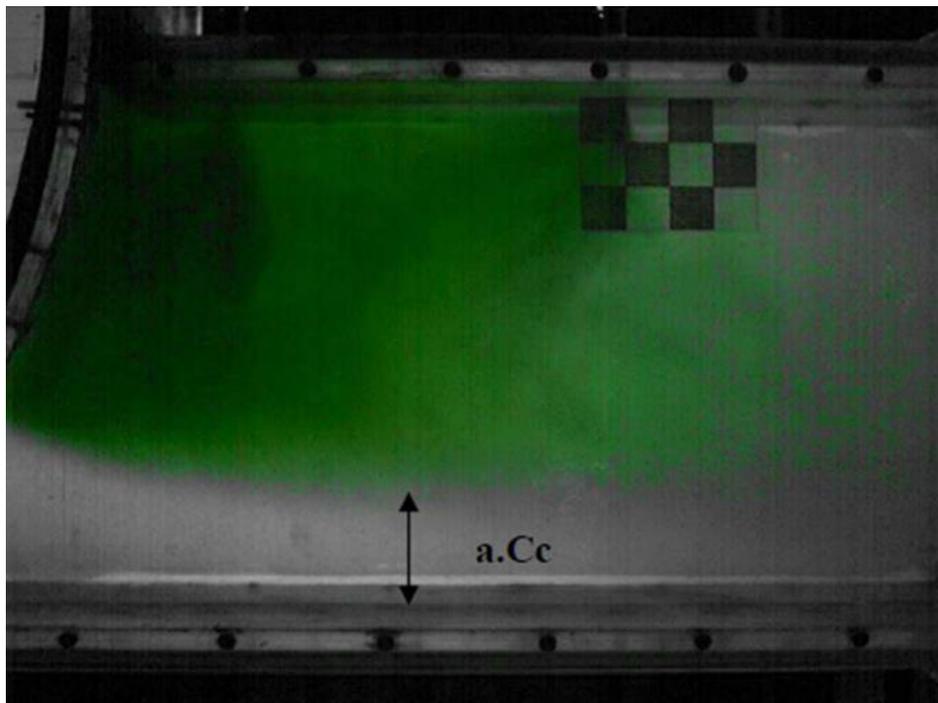
(Fonte: NBR 7259/01)

3.2 ESCOAMENTO A JUSANTE DE COMPORTAS

A veia contraída, figura 5, também chamada de vena contracta, é a região do escoamento a jusante da comporta, que como o próprio nome indica, sofre a maior contração. Na figura 6, estão apontados os coeficientes de contração em comportas segmento invertida, instaladas em condutos forçados retangulares (para cada geometria de comporta e de conduto encontra-se diferentes valores), em diversas aberturas, encontrados por diversos autores, e ajustada uma curva para obtenção do parâmetro (detalhe para a grande dispersão, pois é um parâmetro de difícil mensuração).

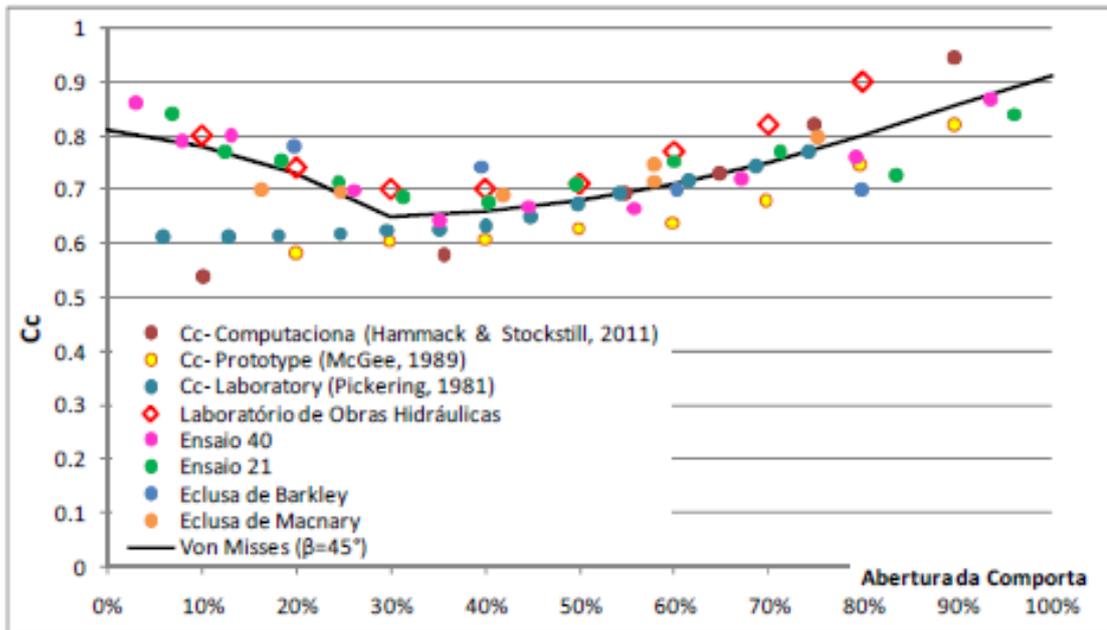
A vena contracta representa o ponto de menor pressão e maior velocidade na base do conduto quando a comporta está parcialmente aberta, ocorrendo perda de carga devido ao atrito nas camadas limites. A jusante da vena contracta a energia cinética volta a se converter em energia potencial (Battiston, 2013).

Figura 5 – Determinação da veia contraída em uma comporta segmento invertida, ensaio com corante



(fonte: Kempka, 2014)

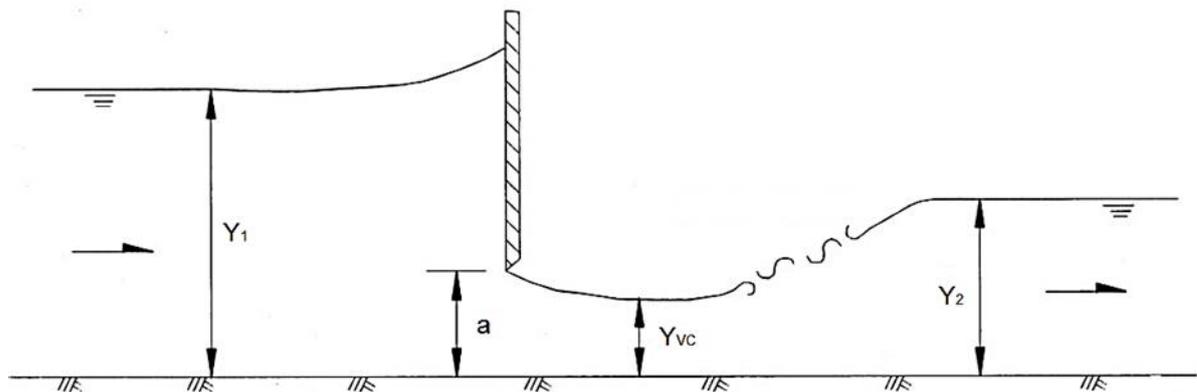
Figura 6 – Coeficiente de contração em comportas segmento invertida para diversos autores



(fonte: Kempka, 2014)

Visto que no escoamento a jusante de comportas ocorre a contração do fluxo, tornando a seção do escoamento menor. Essa contração do fluxo acaba aumentando as velocidades médias na seção, conforme exemplificado na figura 7, para escoamento livres.

Figura 7 – Escoamento livre a jusante de uma comporta



(Fonte: adaptado de Lin, 2002)

De acordo com Lin (2002), o grau de contração do escoamento a jusante de uma comporta pode ser representado pelo coeficiente de contração (C_c), definido como a razão entre a lâmina de água na seção da veia contraída (Y_{vc}) e a abertura da comporta (a), conforme a fórmula 1 e a figura 5.

$$C_c = \frac{Y_{vc}}{a} \quad (\text{fórmula 1})$$

Sendo:

C_c = Coeficiente de contração;

Y_{vc} = Altura da água na veia contraída;

a = Altura da água na abertura da comporta.

O coeficiente de contração (C_c) pode ser relacionado com o coeficiente de descarga (C_d), introduzido para considerar as perdas de carga e corrigir a hipótese adotada de que os vetores velocidades são perpendiculares à seção do orifício, Arauz (2005), a relação entre o coeficiente de descarga e o coeficiente de contração, para fluxo livre, é dada pela fórmula 2:

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{C_c \cdot a}{Y_1}}} \quad (\text{fórmula 2})$$

Sendo:

C_d = Coeficiente de descarga;

C_c = Coeficiente de contração;

Y_1 = Altura da água a montante da comporta;

a = Altura da água na abertura da comporta.

Com o coeficiente de descarga é possível calcular a vazão, dada pela fórmula 3:

$$Q = C_d \cdot a \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot Y_1} \quad (\text{fórmula 3})$$

Sendo:

Q = Vazão;

C_d = Coeficiente de descarga;

a = Altura da água na vena contraída;

g = Aceleração da gravidade;

Y_1 = Altura da água a montante da comporta.

Entrando na área de condutos forçados, Brighetti (1988) explica que o coeficiente de contração (fórmula 4) pode ser definido como sendo a razão entre a menor área ocupada pelo jato d'água a jusante da comporta e a área de abertura da mesma. Essa análise se faz necessária para determinar, com maior veracidade, a velocidade média do jato da veia contraída.

$$C_c = \frac{s_{vc}}{l * a} \quad (\text{fórmula 4})$$

Sendo:

C_c = Coeficiente de contração;

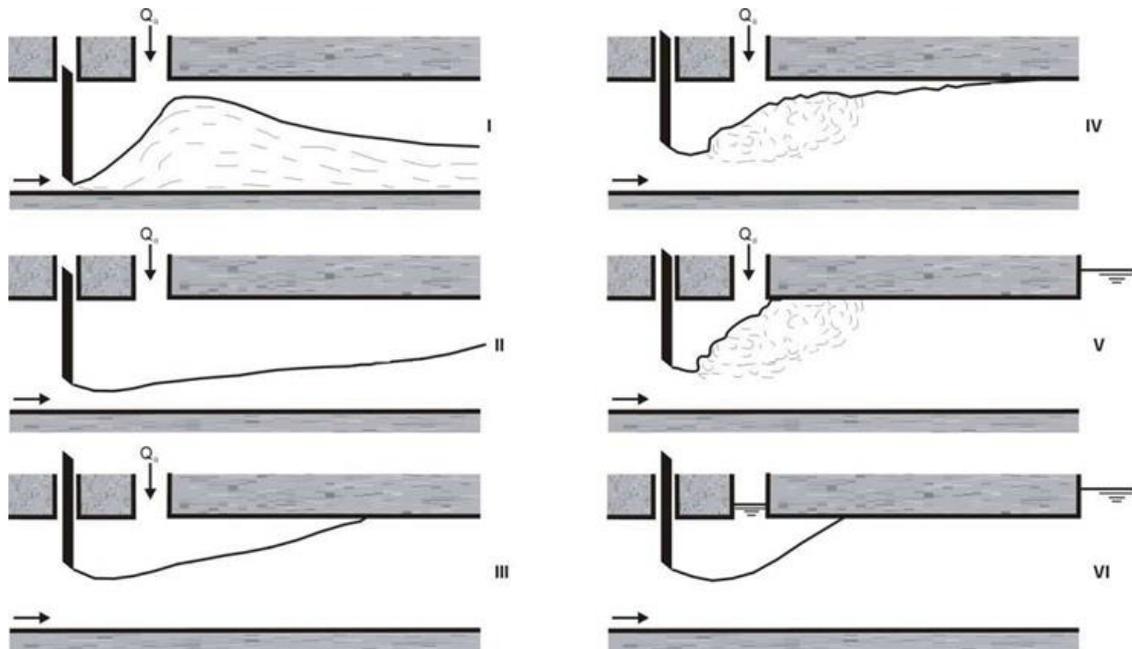
s_{vc} = Área da seção na menor altura da veia contraída;

l = Largura do aqueduto;

a = Altura da água na vena contraída.

Os escoamentos a jusantes de comportas em condutos horizontais, segundo Sharma apud Battiston (2013), podem ser divididos em seis tipos para os casos em que a comporta está parcialmente aberta, conforme figura 8.

Figura 8 - Classificação dos tipos de escoamento a jusante de comportas em condutos



(Fonte: Sharma apud Battiston, 2013)

- I - Escoamento pulverizado;
- II- Escoamento com superfície livre;
- III - Escoamento com emulsão de ar;
- IV - Ressalto com superfície livre;
- V - Ressalto com escoamento em carga;
- VI - Ressalto afogado.

Os quatro primeiros (I a IV) correspondem a escoamentos à superfície livre, com grande quantidade de ar incorporado, e os dois últimos (V e VI) correspondem a escoamentos que podem ocorrer a jusante de comportas em condutos forçados, sendo o escoamento tipo V, a situação crítica, como o fechamento abrupto e emergencial. O símbolo Q com seta vertical direcionada para baixo representa vazão de ar incorporada ao escoamento.

A perda de carga singular em uma comporta segmento invertida pode ser calculada com a utilização da fórmula 5 (USACE, 2018):

$$K_s = \frac{h_p}{\frac{V^2}{2 \cdot g}} \quad (\text{fórmula 5})$$

Sendo:

K_s = Coeficiente de perda de carga singular;

h_p = Perda de carga singular;

V = Velocidade média no conduto a montante da comporta;

g = Aceleração da gravidade.

Cuomo (1982) apresenta uma equação para cálculo da perda de carga para, determinada teoricamente com a aplicação da equação de Borda combinada com a condição de continuidade, conforme fórmula 6, válida para comportas segmento invertida:

$$K_s = \left[\frac{1 - C_c \cdot \alpha}{C_c \cdot \alpha} \right]^2 \quad (\text{fórmula 6})$$

Sendo:

C_c = Coeficiente de contração;

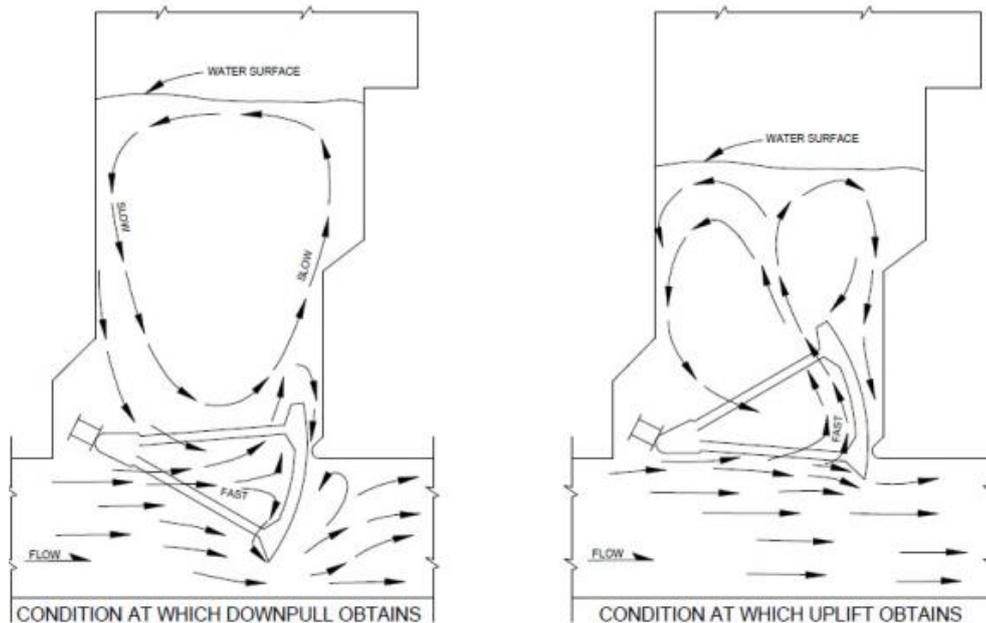
α = Abertura da comporta.

Quando uma comporta está completamente fechada e o líquido por ela totalmente represado, em repouso, as pressões obedecem às leis hidrostáticas. Com a comporta parcialmente aberta, o equilíbrio hidrostático é rompido e se observa uma distribuição não uniforme da carga piezométrica no conduto, junto à comporta. Os esforços hidrodinâmicos de abaixamento (downpull) e de levantamento (uplift) podem ser definidos como a força resultante induzida pelo escoamento nas superfícies das comportas que atua na direção do fechamento ou da abertura (ERBISTE, 1987).

As forças de downpull (tendência de fechar a comporta) são maiores em menores aberturas da comporta, as forças de upflit (tendência de abrir a comporta) são maiores em maiores da

comporta. Para o caso das comportas segmento invertida, figura 9, estudos em modelos físicos apresentaram a existência de esforços de downpull de 0% a 75% de abertura e de uplift a partir dos 75% de abertura (USACE, 2018).

Figura 9 – Forças de downpull e uplift para comporta segmento invertida



(fonte: USACE, 2018)

De acordo com Mustafa (2019), a determinação da força de downpull para as comportas dos condutos requer a estimativa do coeficiente de pressão da água, que é afetado pela geometria do lábio da comporta e pelo fluxo de água sob a mesma. Alterando a forma do lábio da comporta, ou alterando a passagem do fluxo, pode ser alcançada uma variação de pressão que reduziria a força de downpull.

3.3 CAVITAÇÃO

A origem do termo cavitação, segundo Kempka (2011), deriva do latim *cavus* - cavidade - significa a formação de bolhas de vapor em um fluido. De acordo com Kormann et al. (2001), na engenharia hidráulica a cavitação é um dos fenômenos mais complexos, seja pelos diversos parâmetros que a influenciam, seja pela grande dificuldade na realização de simulações em laboratório. Estudos relacionados ao fenômeno da cavitação vem sendo realizados com a utilização de modelos reduzidos que simulam as condições de operação para diferentes estruturas hidráulicas, tais como, vertedouros, descarregadores de fundo, bacias de dissipação, comportas de controle de vazão, dentre outros, como forma de auferir esforços que poderiam desencadear processos de cavitação.

Macintyre (2016) afirma que efeitos da cavitação são visíveis, mensuráveis e até audíveis, parecendo o crepitar de lenha seca ao fogo ou um martelamento com frequência elevada. As pressões exercidas sobre as superfícies pela ação da percussão (contato da água com a estrutura) das partículas condensadas ou pela onda de choque por ela provocada alcançam valores relativamente elevados, mas não tão intensos que pudessem normalmente produzir a ruptura do material. Várias explicações têm sido apresentadas para esclarecer essa ação destruidora. É admitido que a alteração periódica e rapidíssima das pressões possa concorrer para o enfraquecimento das estruturas dos cristais dos materiais. Outros supõem que, devido à percussão das partículas condensadas, com uma frequência de vários milhares de ciclos por segundo, possam ocorrer, em pontos pequeníssimos das superfícies, temperaturas elevadas que reduziriam a resistência dos cristais, podendo então as pressões de colapso das bolhas ser suficientes para desagregar partículas do material.

As velocidades têm grande importância no fenômeno de cavitação, tais velocidades são de grande importância logo a jusante das válvulas, pois há ocorrência de velocidades muito altas do jato e depressão implicando em cavitação. As pressões muito baixas associadas às velocidades elevadas implicam altos potenciais de cavitação e, portanto, requerem atenção especial, qualquer que seja a solução de projeto para controle, como revestimento ou abaixamento da cota de assentamento da válvula e/ou introdução de ar ou, combinação desses elementos, indica Santos (1998).

3.3.1 Cavitação em Diferentes Estruturas e Equipamentos Hidromecânicos

Existem muitas estruturas hidráulicas e hidromecânicas em que pode ocorrer o fenômeno da cavitação durante sua operação, as principais serão abordadas de forma sucinta para melhor entendimento do fenômeno.

3.3.1.1 Cavitação em Bombas Hidráulicas

A cavitação é um fenômeno de grande relevância para dimensionamento de bombas hidráulicas, se a pressão de vapor reduzir e atingir um valor abaixo da pressão de vapor ocorre a vaporização do líquido, e, conseqüentemente, a erosão (remoção de pedaços dos rotores e da tubulação de aspiração).

Macintyre (2016) explica que além de provocar corrosão, desgastando, removendo partículas e destruindo pedaços de rotores e dos tubos de aspiração junto à entrada da bomba, a cavitação se apresenta, produzindo:

- a) queda de rendimento (na cavitação incipiente, paradoxalmente, o rendimento melhora um pouco; aumentando a cavitação, o rendimento cai bruscamente).
- b) marcha irregular, trepidação e vibração da máquina, pelo desbalanceamento que acarreta.
- c) ruído, provocado pelo fenômeno de “implosão”, pelo qual o líquido se precipita nos vacúolos ou bolsas quando a pressão externa é superior à existente no interior das mesmas. Isso ocorre de uma forma aleatória, sendo impossível prever todas as características com que o fenômeno irá se desenvolver.

No dimensionamento de bombas, para que ocorram condições de uma aspiração sem o problema de cavitação, é comumente utilizado o conceito de NPSH “Net Positive Suction Head”. Este conceito se refere à disponibilidade de energia do líquido ao entrar na bomba (sucção), e depende da instalação.

Neste dimensionamento deve ser garantido que o $NPSH_{DISPONÍVEL}$ seja maior que o $NPSH_{REQUERIDO}$, o cálculo do $NPSH_{DISPONÍVEL}$ pode ser obtido através da fórmula 7

(Netto, 2015).

$$NPSH_{DISPONÍVEL} = \pm H + \left(\frac{P_a - P_v}{\gamma} \right) \cdot 10 - h_f \quad (\text{fórmula 7})$$

Sendo:

+ H = Carga ou altura de água na sucção (entrada afogada);

- H = Altura da aspiração;

P_a = Pressão atmosférica no local;

P_v = Pressão de vapor;

γ = Peso específico da água;

h_f = Soma das perdas de carga na sucção.

É necessário que haja uma diferença entre o $NPSH_{DISPONÍVEL}$ e o $NPSH_{REQUERIDO}$, evitando valores iguais ou muito próximos, fornecendo assim um fator de segurança, conforme fórmula 8 (Macintyre, 2016). Usualmente o $NPSH_{REQUERIDO}$ é fornecido pelo fabricante da bomba.

$$NPSH_{DISPONÍVEL} - NPSH_{REQUERIDO} = \text{Reserva} \quad (\text{fórmula 8})$$

Para examinar as condições de funcionamento de uma instalação, para previsão ou eliminação do risco de cavitação, é utilizado o fator de cavitação de Thoma, obtido através da fórmula 9 (Netto, 2015).

$$\sigma_{Thoma} = \left(\frac{H_a - H_s - H_v}{H_m} \right) \quad (\text{fórmula 9})$$

Sendo:

H_m = Altura efetiva da bomba (manométrica);

H_a = Altura correspondente à pressão atmosférica local;

H_s = Altura de sucção das bombas;

H_v = Altura devido à pressão de vapor de água.

Além disso, Macintyre (2016), aponta que o σ_{Thoma} , fator de cavitação de Thoma, depende da rotação específica, e quanto maior a rotação maior será o valor de σ_{Thoma} . O autor cita outra forma de calcular o σ_{Thoma} , utilizando uma fórmula empírica, esta sendo determinada através de grande número de ensaios, apresentada abaixo como fórmula 10. Widdern (fórmula 11) e Wislicenus (fórmula 12), propuseram fórmulas para que seja possível traçar o fator de cavitação limite em função da velocidade específica conforme figura 10.

$$\sigma_{Thoma} = \left(\varphi \cdot n_q^{\frac{4}{3}} \right) \quad (\text{fórmula 10})$$

Sendo:

φ = fator que depende da rotação específica;

$\varphi = 0,0011$ para bombas centrífugas radiais, lentas e normais;

$\varphi = 0,0013$ para bombas helicoidais e hélico-axiais;

$\varphi = 0,00145$ para bombas axiais;

n_q = rotação específica.

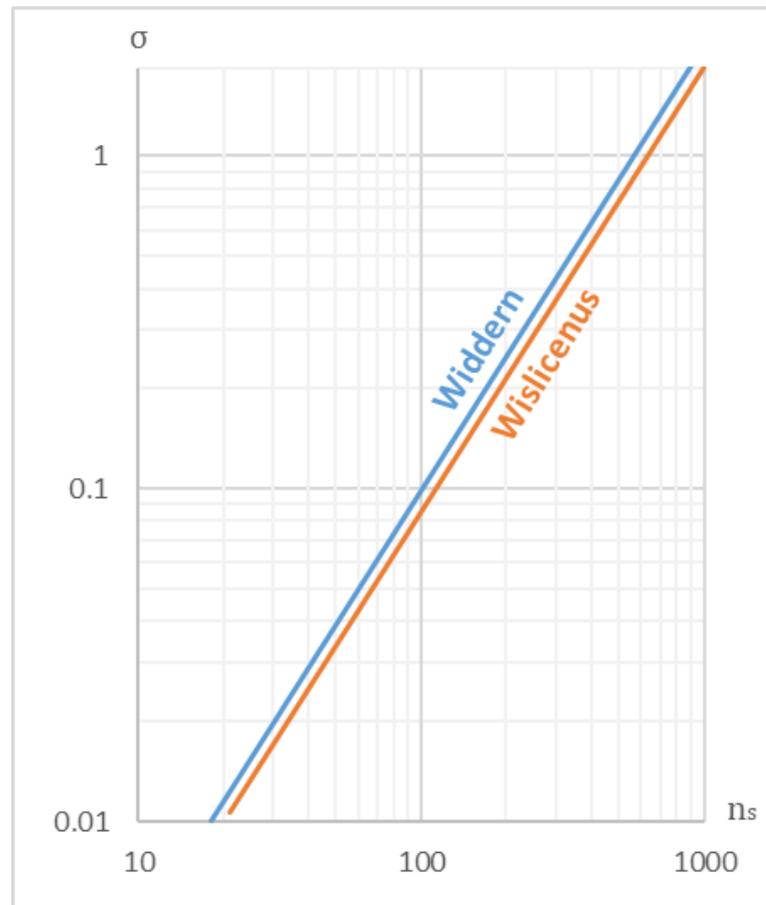
$$Widdern \sigma = \frac{2,14 \cdot n_s^{\frac{4}{3}}}{10^4} \quad (\text{fórmula 11})$$

$$Wislicenus \sigma = \frac{1,84 \cdot n_s^{\frac{4}{3}}}{10^4} \quad (\text{fórmula 12})$$

Sendo:

n_s = velocidade específica.

Figura 10 – Fator de cavitação em função da velocidade específica segundo Wislicenus e Widdern



(fonte: adaptado de Macintyre, 2016)

As bombas devem ser projetadas acima das linhas fornecida pelos autores, e é possível concluir que bombas com maior velocidade específica, necessitam de uma maior altura de aspiração, ou até mesmo positiva (fórmula 7, bomba afogada), como é o caso das bombas axiais.

3.3.1.2 Cavitação em Hélices

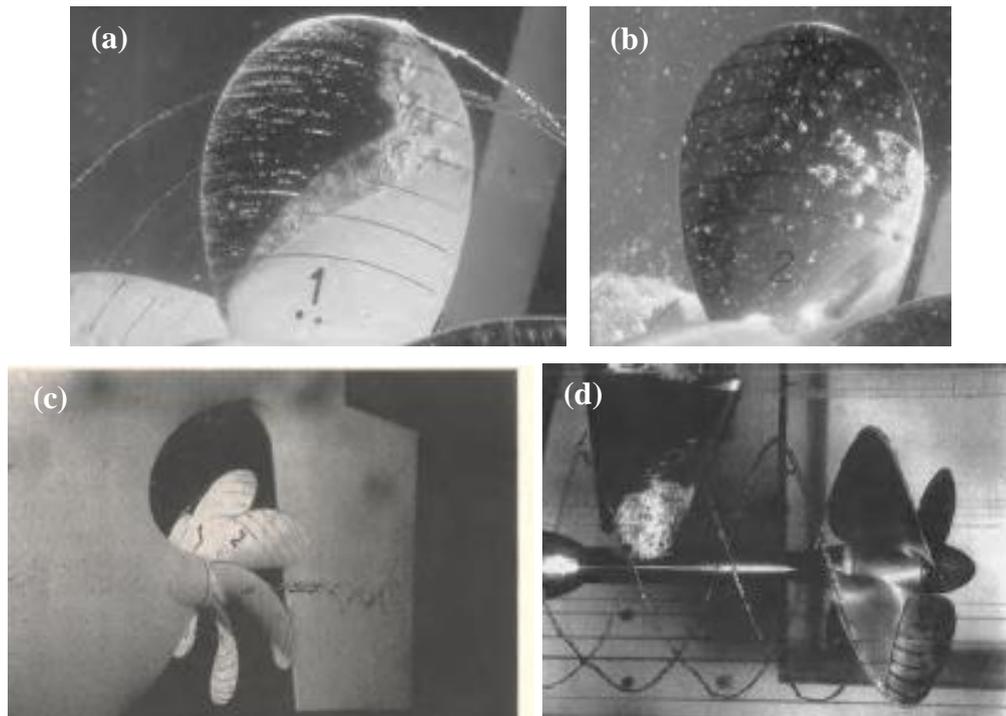
Em um meio ideal, com a água atuando apenas contra a superfície das hélices, ou seja, água sem impurezas e ar dissolvido, a cavitação ocorrerá quando a pressão total atingir localmente a pressão de vapor a dada temperatura. Na prática, a cavitação inicia-se para valores de pressão superiores pela presença de partículas microscópicas e da existência de ar dissolvido na água que facilitam e antecipam o início do processo cavitação. (Trindade, 2012).

A cavitação em hélices navais pode ser dividida em quatro tipos diferentes, sendo os padrões que ocorrem nos propulsores geralmente referidos como compreendidos em um ou mais dos

seguintes tipos: folha, bolha, nuvem, vórtices e estão exemplificados na figura 11 (Carlton, 2007).

- a. folha (figura 11 - a): quando operando em sua rotação com ângulos positivos de incidência, esse tipo de cavitação aparece na borda do dorso das pás, operando em incidência negativa, a cavitação ocorre no rosto das pás. Cavitação tipo folha ocorre por causa do ângulo de ataque da pá e altas pressões de sucção, onde a cavitação cresce radialmente e na direção do comprimento da pá, formando uma folha acima da pá que pode se estender de acordo com o formato da pá e com as condições do ambiente;
- b. bolha (figura 11 – b): influenciada primeiramente pelos componentes de distribuição de pressão que causam alta pressão sucção de pressão na região do meio do comprimento das pás. A combinação entre a curvatura da pá e a sua espessura de seção também influenciam nesse tipo de cavitação. A cavitação tipo bolha ocorre principalmente no meio da pá e regiões de máxima espessura, onde as bolhas crescem e estouram rápido;
- c. nuvem (figuras 11 – a e 11 – b): é encontrada principalmente posterior a cavitações do tipo folha, para isso a cavitação do tipo folha normalmente está bem desenvolvida e com comportamento estável, ocorre a formação de pequenos vórtices através de pequenas bolhas de cavitação. Apresenta uma aparência de uma nuvem de pequenas bolhas de cavitação;
- d. vórtices: a cavitação em formato de vórtices pode ser dividida em dois grupos vórtice de cubo (figura 11 – c) e vórtice de pontas (figura 11 – d). O vórtice de cubo é formado pela combinação de vórtices individuais gerados por cada lâmina da hélice, embora não cause cavitação individualmente, sob a influência do cone de hélice, a combinação dos vórtices na raiz da lâmina tem uma alta suscetibilidade a cavitação. O vórtice de pontas é usualmente encontrado distante das pontas das pás da hélice, a esta altura, o vórtice de ponta é dito "desapegado", mas à medida que o vórtice se torna mais forte, seja através do carregamento de lâmina mais alta ou diminuindo o número de cavitação, ele se move para a ponta da lâmina e, finalmente, fica aderido.

Figura 11 – Tipos de cavitação em hélices



(fonte: adaptado de Carlton, 2007)

O conceito de supercavitação é introduzido, tal conceito é muito utilizado em embarcações pequenas e de grande velocidade, em que a cavitação não pode ser evitada, sendo assim tem-se uma zona supercavitante em alguma seção da lâmina. As fórmulas 13 e 14 mostram os parâmetros de entrada para obtenção do índice de cavitação livre baseada no fluxo (σ_0) e coeficiente de avanço da hélice (J), e a figura 12 elenca as zonas de operação para hélices supercavitantes e hélices convencionais.

$$\sigma_0 = \left(\frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_a^2} \right) \quad (\text{fórmula 13})$$

Sendo:

P_0 = Pressão de referência;

P_v = Pressão de vapor;

ρ = Massa específica;

v_a = Velocidade axial.

$$J = \left(\frac{V_a}{n \cdot D} \right) \quad (\text{fórmula 14})$$

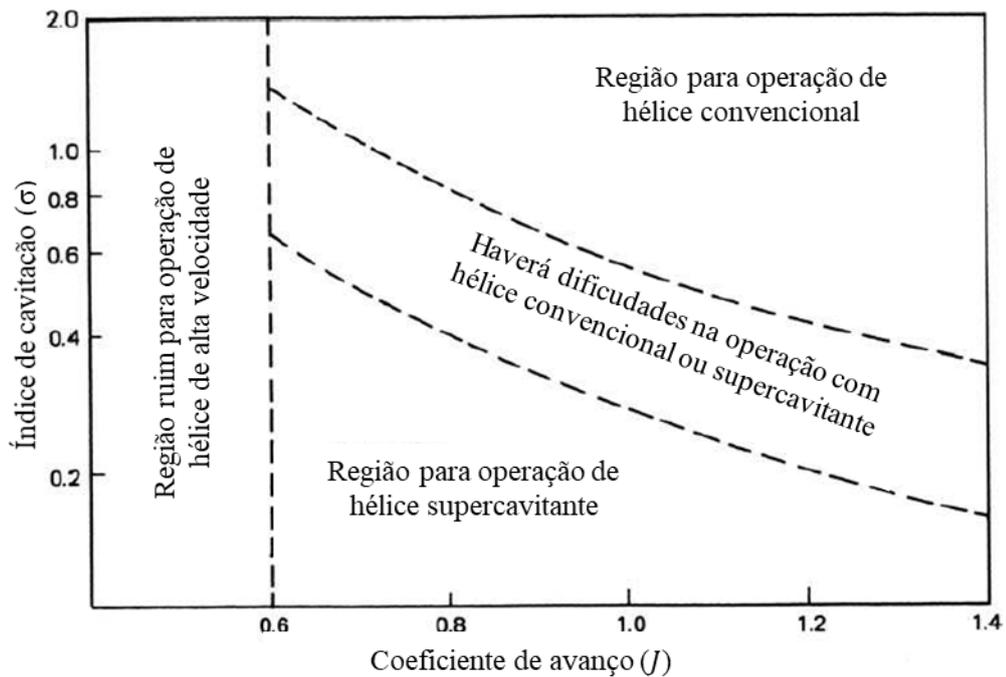
Sendo:

V_a = Velocidade de avanço;

n = Velocidade de rotação;

D = Diâmetro da hélice.

Figura 12 – Zonas de operação



(fonte: adaptado de Carlton, 2007)

3.3.1.3 Cavitação em Blocos Dissipadores de Energia e de Queda

Quintela (1980), explica em seu trabalho, o conceito de índice de cavitação limite para obras hidráulicas, em que o início e a intensidade da cavitação dependem da estrutura dinâmica do escoamento caracterizada pela distribuição de velocidades, pelas características da camada limite, pelos campos de pressões médias e de flutuações de pressão, etc. Se as forças de viscosidade e de compressibilidade têm valores considerados desprezíveis, a pressão varia com o quadrado da velocidade e o parâmetro característico da cavitação, citado pelo autor como, parâmetro de cavitação, segue a fórmula 15.

$$\sigma = \frac{(P_r - P_v)}{\rho \cdot \frac{V_r^2}{2}} \quad (\text{fórmula 15})$$

Sendo:

P_r = Pressão absoluta num ponto do sistema, fora da zona de cavitação;

P_v = Pressão no interior das bolhas de cavitação (geralmente se toma um valor igual à tensão de vapor de água na temperatura em que se encontra);

V_r = Velocidade num dado ponto de referência;

ρ = Massa específica da água.

O parâmetro adimensional, σ , caracteriza um estado de desenvolvimento de cavitação e pode ser considerado como o quociente entre as forças que se opõem à ruptura da continuidade do escoamento e forças que auxiliam essa ruptura:

σ – Parâmetro de cavitação correspondente às grandezas hidráulicas do escoamento em estudo;

σ_{cr} – Parâmetro que caracteriza o aparecimento da cavitação (cavitação incipiente), dito como parâmetro crítico de cavitação.

A figura 13 mostra alguns formatos de blocos dissipadores ensaiados e os limites obtidos quando se iniciou o processo de erosão pelo fenômeno da cavitação, os índices foram obtidos através da fórmula 16, também foram evidenciadas as zonas em que ocorreu maior cavitação para cada formato de bloco.

Figura 13 – Tipos de blocos dispersores e de amortecimento (dimensões em mm). Parâmetros de cavitação críticos σ_{cr} e zonas de erosão

Tipo e dimensões	(I)	Tipo e dimensões	(I)	Tipo e dimensões	(I)	Tipo e dimensões	(I)
	2.1		1.9		0.68		0.75
	2.3		1.1		1.9		0.65
	2.2		2.1		0.8		1.8

(fonte: Quintela, 1980)

$$\sigma = \frac{(Ha - h - Hv)}{\frac{V_{ca}^2}{2 \cdot g}} \tag{fórmula 16}$$

Sendo:

Ha = Altura piezométrica correspondente à pressão na atmosfera acima da superfície livre da água;

h = Altura da água acima do bloco;

Hv = Altura piezométrica correspondente à tensão de saturação de vapor de água;

V_{ca} = Velocidade característica, velocidade na seção correspondente à primeira altura conjugada.

Danos no concreto na região dos blocos dissipadores de energia são muito comuns, conforme exemplificado na figura 14, estes danos podem comprometer o revestimento, e até mesmo, em alguns casos mais graves, comprometer a estrutura. A opção por blocos supercavitantes, assim como nas hélices, é uma opção a ser considerada, pois blocos supercavitantes (figura 13, blocos de 8 a 12) apresentam um formato ao qual favorece a formação de vórtices em suas arestas, distanciando-se das superfícies das fronteiras sólidas, ocorrendo assim, apenas em áreas controladas e aumentando a vida útil das obras hidráulicas.

Figura 14 – Blocos dissipadores de energia após ocorrência de cavitação



(fonte: ICOLD, 2002)

3.3.1.4 Cavitação em Vertedouros

Vertedouros são estruturas que promovem o extravasamento do volume de água excedente em reservatórios de barragens e também são projetadas para dissipar parte da energia hidráulica do escoamento, havendo possibilidade de ocorrência de pressões extremas e ocorrência de cavitação causada pela grande velocidade do escoamento. Sendo assim, o estudo da dissipação de energia nos vertedouros é muito importante, tendo em vista a necessidade de otimizar essas estruturas, e as figuras 15 e 16 contém exemplos de estruturas de vertedouros em operação.

Falvey (1980), cita em seu trabalho que ocorrerá cavitação sempre que a pressão local na corrente de água cai abaixo da pressão de vapor. Por exemplo, isso pode acontecer durante o surto de uma onda de golpe de aríete quando a pressão piezométrica em um tubo cai abaixo pressão atmosférica. No entanto, as mais comuns fontes de cavitação em estruturas hidráulicas são irregularidades na superfície do fluxo. A cavitação tende a assumir o formato semelhante a uma árvore de Natal (figura 17) sendo que uma vez formado o dano da cavitação, é assumido que a área danificada se torna uma fonte de cavitação o que cria outra área de dano a jusante, pois a área é maior que a irregularidade que o causou, o processo continua para produzir áreas cada vez maiores de danos.

Figura 15 – Vertedouro da barragem de Pedrogão



(fonte: Matos, 2014)

Figura 16 – Vertedouro da barragem de Itaipu Binacional



(fonte: Borja, 2012)

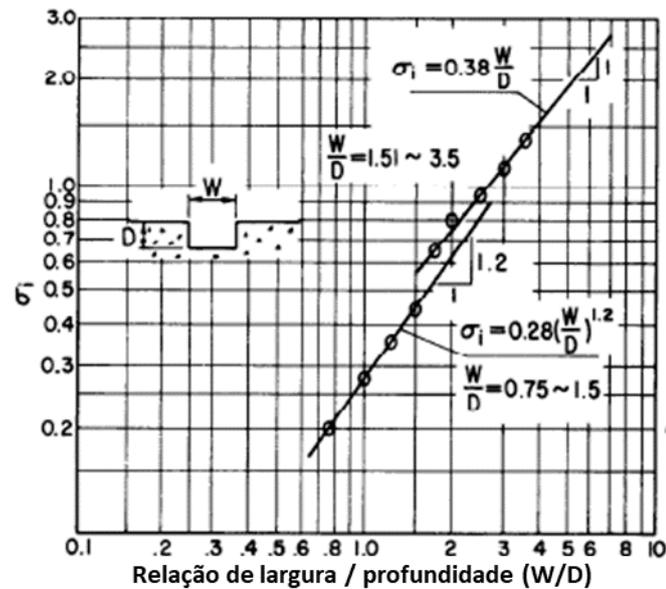
Figura 17 - Barragem de Glen Canyon, túnel do vertedouro esquerdo, setembro de 1983, buraco com 11 metros de profundidade



(fonte: Falvey, 1980)

Uma pequena imperfeição ao longo do vertedouro, ou uma pequena ranhura de um poço para abertura e fechamento da comporta em um túnel podem ser o fator que gera o início de cavitação, podendo desencadear um efeito em cadeia. A figura 18 mostra o índice de cavitação incipiente (σ_i) para uma ranhura em função da relação largura / profundidade (W/D), obtidos através de ensaios.

Figura 18 – Índice de cavitação incipiente para ranhura retangular

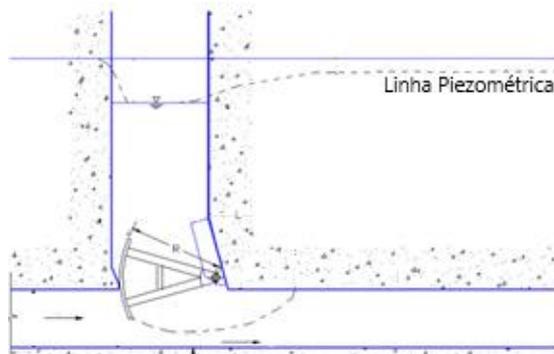


(fonte: Falvey, 1980)

3.3.2 Cavitação em Comportas Segmento Invertida

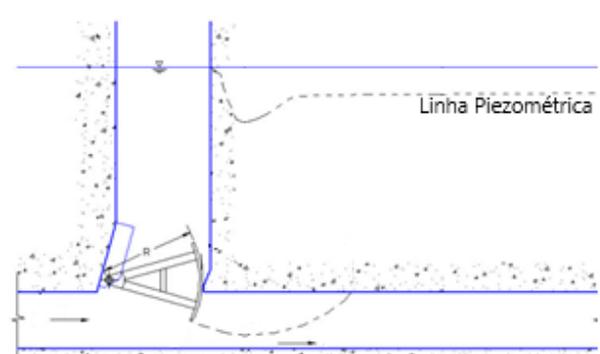
As primeiras comportas do tipo segmento invertida (figura 20) foram utilizadas primeiramente, para substituir as comportas segmento na posição regular (figura 19), em eclusas de navegação, pois estas reduzem a entrada de ar pelo poço comporta, conseqüentemente, reduzem a agitação no interior da câmara das eclusas. Entretanto, a comporta segmento invertida, pode ser também uma opção de comporta para descarregadores de fundo, ou outros projetos que se adaptem.

Figura 19 – Comporta segmento (posição regular)



(fonte: adaptado de USACE, 2018)

Figura 20 – Comporta segmento invertida



(fonte: adaptado de USACE, 2018)

Santos (1998) aponta que os critérios relativos à prevenção da cavitação a jusante de comportas, foram muito discutidos na década de 80 com pesquisadores americanos, que revisavam valores para projeto, em função das pesquisas levadas a efeito na eclusa de John Day. Tem-se como apropriado o critério seguinte (fórmula 17), que hoje preconiza a EM 1110-2-1610, do Corps of Engineers (USA), e a publicação específica Hydraulic Design of Lock Culvert Values, também do Corps of Engineers. O autor também explica a importância da abertura de 60 % da comporta, condição para a qual as comportas segmento invertida têm apresentado o caso mais crítico de operação.

$$\sigma = \frac{P + (P_a - P_v)}{\frac{V_v^2}{2 * g}} \quad (\text{fórmula 17})$$

Sendo:

P = Pressão na veia contraída logo a jusante da comporta, que é uma posição variável com o grau de abertura

P_a = Pressão atmosférica local;

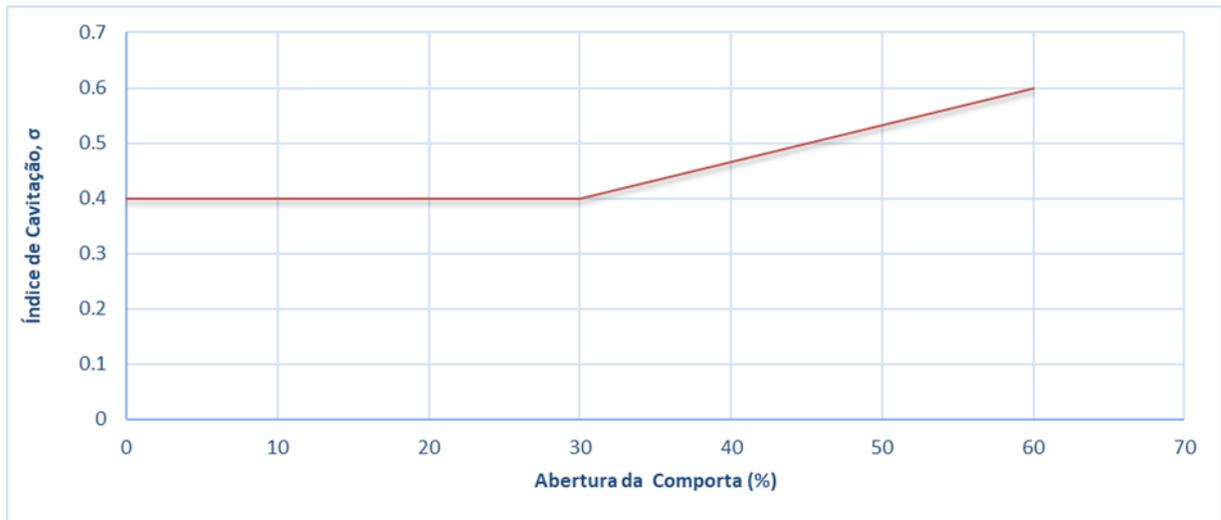
P_v = Pressão de vapor da água na temperatura considerada em projeto;

V_v^2 = Velocidade na veia contraída logo a jusante da comporta;

g = Aceleração da gravidade.

Brighetti (1988) esclarece que em comportas segmento invertida, utiliza-se o critério referido como John Day, adotando para limite inferior do índice de cavitação (σ), o valor de 0.4 para 30% de abertura das comportas, 0.6 para 60%, obedecendo uma relação linear entre as duas aberturas, como mostra a figura 21.

Figura 21 – Índices de cavitação limites para comporta segmento invertida



(fonte: elaborada pelo autor, adaptada de BRIGHETTI, 1988)

USACE (2018) comenta que tem havido muita discussão sobre o valor do índice de cavitação que está associado à cavitação incipiente em sistemas não aerados. O valor de índice de cavitação aceitável de 0.61 têm sido usado por muitos e esse valor é comprovado pelo estudo de protótipo de Whitten Lock. Buscando sempre evitar índices de cavitação limites menores que 0.6, principalmente na abertura de 60%.

3.4 PRESSÕES A JUSANTE DE COMPORTAS SEGMENTO INVERTIDA

Diversos estudos têm sido feitos para estudar o comportamento das pressões a jusante de comportas segmento invertidas, entre estes, podem ser citados, os trabalhos realizados por Palauro (2012), Dalla Corte (2013), Battiston (2013), Kempka (2014), Dutra (2014), Abreu (2014), Priebe (2016) e Sell (2018). Estas medições e análises de pressões são importantes para aferição das perdas de cargas ao longo dos circuitos hidráulicos, para o projeto estrutural, pois dão informações sobre esforços na estrutura para possíveis pontos que necessitem de proteção especial (Palauro, 2012).

Palauro (2012) avaliou as pressões médias e extremas mínimas a jusante de uma comporta tipo segmento invertida e comparou estas pressões em regime permanente e em regime transitório de escoamento, concluindo que o comportamento das pressões mínimas para os dois regimes diverge, sendo que para o regime permanente as pressões extremas mínimas ocorrem para aberturas menores entre 20% e 40% e para regime transitório entre 30% e 70%.

Dalla Corte (2013) avaliou as pressões em regime de escoamento permanente através de simulações numéricas, estabelecendo que o modelo numérico proposto reproduz com boa aproximação os resultados experimentais de pressões médias na base e no teto do conduto a jusante da comporta. Concluiu que há um decréscimo da pressão, abaixo e a jusante da comporta, que os diferenciais de pressão tornam-se mais acentuados à medida que a comporta fecha e que o comprimento da recirculação a jusante da comporta diminui à medida que a abertura da comporta aumenta.

Battiston (2013) caracterizou o comportamento das pressões médias, flutuantes, máximas e mínimas ao longo da base e do teto do conduto por meio de uma relação entre coeficientes adimensionais de posição e coeficientes adimensionais de pressão média, flutuação de pressão, pressão mínima para as probabilidades de não excedência de 0.1% e 1%. Concluiu-se que para as condições operacionais com a comporta parcialmente aberta, as menores pressões ocorreram no teto do conduto próximo à comporta, região de recirculação do escoamento, e junto ao terminal da comporta. Também avaliou a aplicabilidade do software de dinâmica de fluidos computacional, *Flow-3D*® com modelo de turbulência $k-\epsilon$, na simulação do escoamento médio, o qual apresentou resultados mais precisos para a base do conduto.

Kempka (2014) analisou o comportamento da distribuição longitudinal das pressões médias e mínimas (0.1% e 1% de não excedência) na base e no teto a jusante de comportas tipo segmento invertida e verificou os adimensionais sugerido por Battiston (2013) para estimar os valores da distribuição longitudinal das pressões médias e mínimas junto à base e ao teto da galeria a jusante da comporta, concluindo que esta metodologia pode ser aplicada para todas as aberturas da comporta e que as curvas de ajuste obtidas por Kempka (2014) apresentaram boa concordância com as curvas recomendadas por Battiston (2013). Também verificou quais condições de abertura da comporta e a que distância da comporta ocorrem as pressões mínimas junto à base e ao teto.

Dutra (2014) desenvolveu através de uma metodologia adimensional de análise, um critério hidráulico para determinar as pressões médias na base e no teto do conduto a jusante da comporta, através de uma equação ajustada por três coeficientes (A, B e C), tendo somente a abertura da comporta, a distância que se quer analisar da mesma e a vazão de operação como variáveis de dimensionamento. Também verificou o comportamento da pressão média, o qual foi semelhante no teto e na base do conduto, apresentando uma diminuição da pressão para as menores aberturas da comporta e maiores vazões.

Abreu (2014), aplicou a metodologia proposta por Kempka (2011), que consiste em definir uma relação entre o índice de cavitação e a abertura da comporta, correlacionando pressões limites de resistência à tração do concreto com índices de cavitação associados a distintas probabilidades de ocorrências de esforços hidrodinâmicos. Também analisou as distribuições das pressões médias e mínimas, onde concluiu que para as aberturas de 30 e 40% existe uma maior zona de influência das pressões e os principais efeitos da erosão por cavitação se manifestam nos pontos de pressão mínima.

Priebe (2016) aplicou análise estatística no conjunto de amostras do modelo e determinou a média, desvio padrão, curtose e os percentis das probabilidades de não excedência de 0.1%, 1%, 99% e 99.9%. Posteriormente utilizou a metodologia proposta por Marques (1997), que considera o efeito acumulativo devido às pressões médias atuantes em cada ponto ao longo do conduto e às flutuações de pressão ponderadas por um coeficiente estatístico e característico de distribuição de probabilidades.

Sell (2018) propôs diferentes parâmetros adimensionais analisando as pressões obtidas a jusante da comporta, com o intuito de auxiliar em futuros trabalhos e projetos. Propondo diferentes parâmetros adimensionais para determinação do trecho a jusante de comportas tipo segmento invertida em que ocorrem processos erosivos. Concluindo que o parâmetro adimensional de operação encontrado é eficiente para encontrar o trecho a jusante de comportas em que há possibilidade de danos por tração.

4 METODOLOGIA

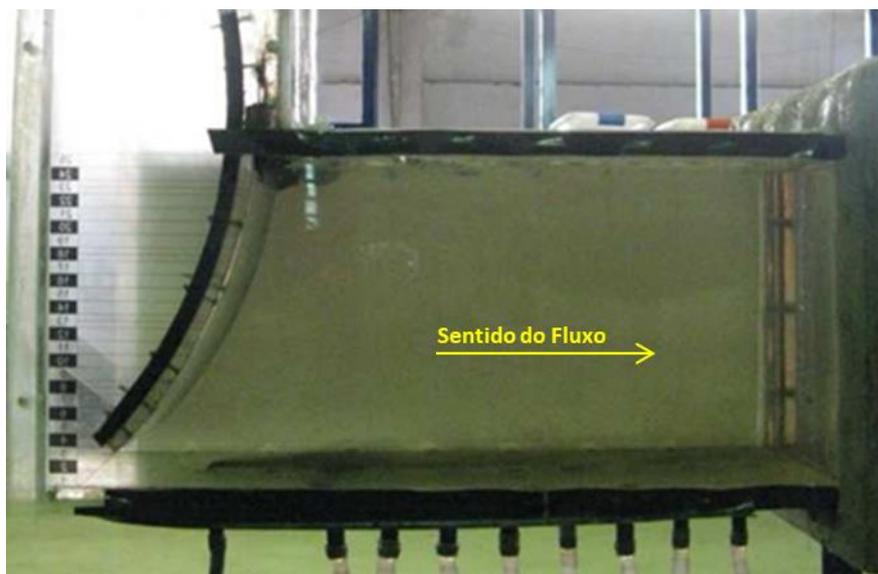
Os dados para o presente estudo foram coletados de dois diferentes modelos reduzidos com comportas tipo segmento invertida. Tomando como base um conduto de seção quadrada de 4m de lado, é possível atribuir escalas aos modelos: o primeiro encontra-se no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) – IPH/UFRGS com escala 1:16 (figura 22), o segundo modelo encontra-se no Laboratório de Hidráulica e Hidroenergia – LHH/UFPeL com escala 1:32 (figura 23).

Figura 22 – Comporta segmento invertida – UFPeL



(fonte: adaptado de Priebe, 2016)

Figura 23 – Comporta segmento invertida – LOH



(fonte: adaptado de Battiston, 2013)

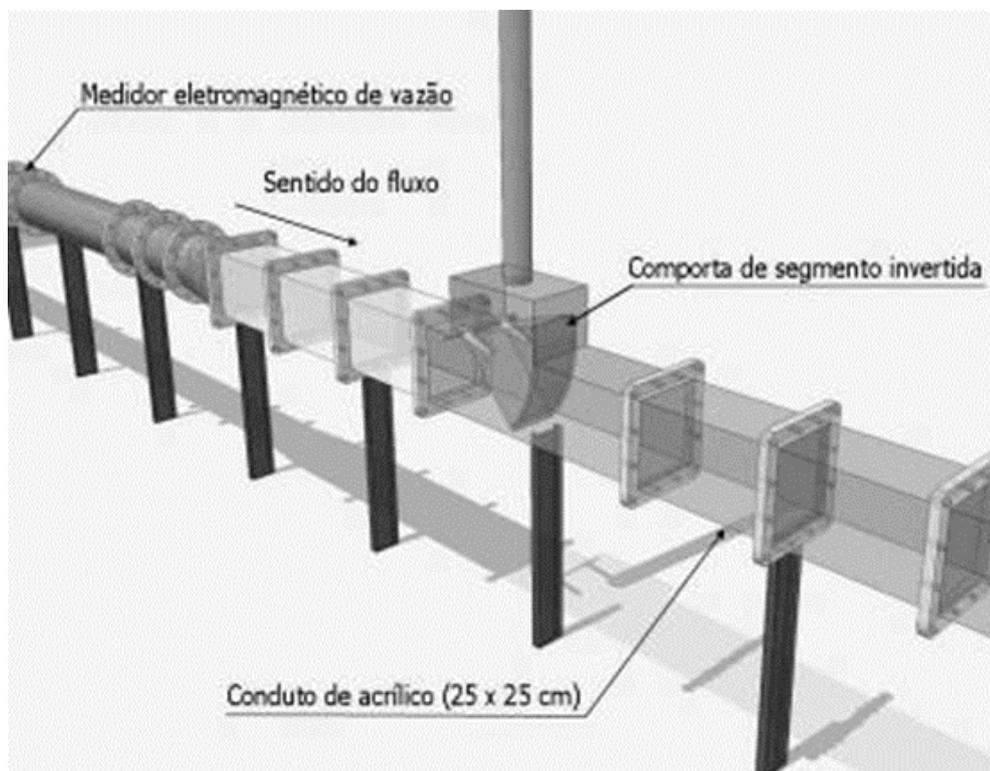
4.1 CONDIÇÕES DE ENSAIO

As instalações experimentais de ambos os modelos são semelhantes e compostas por um sistema de alimentação, no qual está associado um medidor de vazão eletromagnético e bombas centrífugas que alimentam os sistemas. Os ensaios também foram organizados e realizados de forma semelhante nos dois modelos reduzidos.

4.1.1 Modelo Reduzido LOH

O modelo reduzido instalado no LOH, conforme esquematizado na figura 24, é composto por um conduto principal de acrílico, de seção quadrada com aresta de 0.25 m e 8.9 m de comprimento, onde está instalada a comporta e onde foram realizadas as medições. A comporta é do tipo segmento invertida, com raio de 0.38 m. Faz parte do sistema, ainda, uma chaminé de equilíbrio com altura de 2.50 m e um reservatório de jusante com volume total de 7.2 m³, que tem como função manter o escoamento afogado a nível constante. Na tabela 1 são apresentadas as vazões ensaiadas para cada abertura da comporta.

Figura 24 – Esquema do modelo reduzido LOH



(fonte: Kempka, 2014)

Tabela 1 – Vazões ensaiadas no modelo reduzido LOH

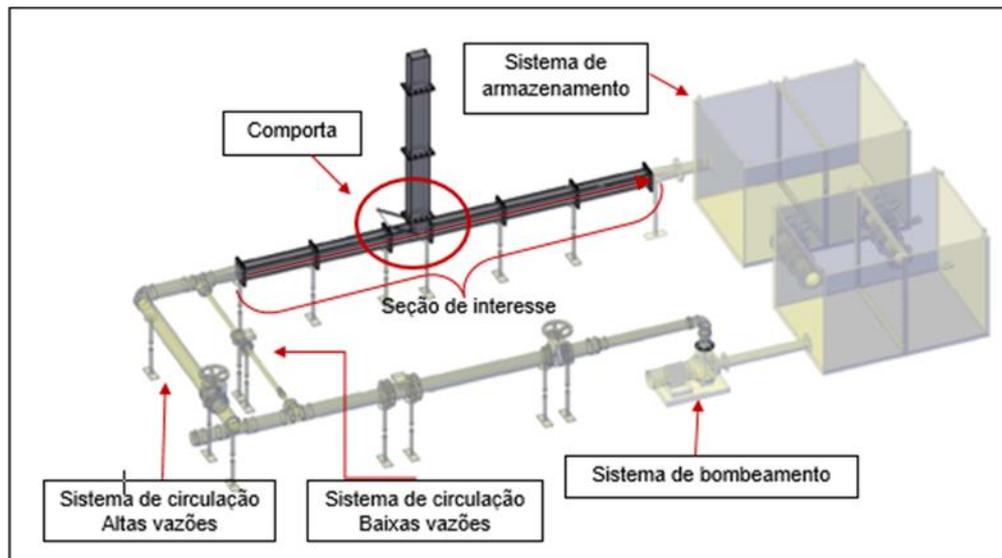
Vazão (l/s)	Abertura da Comporta (%)							
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
22	x	x	x	x	x	x	x	x
32	x	x	x	x	x	x	x	x
40		x	x	x	x	x	x	x
60		x	x	x	x	x	x	x
80			x	x	x	x	x	x

(elaborada pelo autor)

4.1.2 Modelo Reduzido UFPel

O modelo reduzido da UFPel, conforme esquematizado na figura 25, é composto por um conduto principal de seção quadrada de acrílico, com dimensões 0.125m x 0.125m e comprimento de 3.00m, por uma comporta de segmento invertida de ferro fundido comum com raio de 0.185m, uma chaminé de equilíbrio em acrílico, com dimensões de 0.125m x 0.20m e altura de 3.5m. Por fim, a jusante da comporta, tem-se um trecho de acrílico com 4.5m de comprimento, onde foram instaladas as tomadas de pressão. Na tabela 2 são apresentadas as vazões ensaiadas para cada abertura da comporta.

Figura 25 – Esquema do modelo reduzido UFPel



(fonte: adaptado de Oliveira, 2016)

Tabela 2 – Vazões ensaiadas no modelo reduzido UFPel

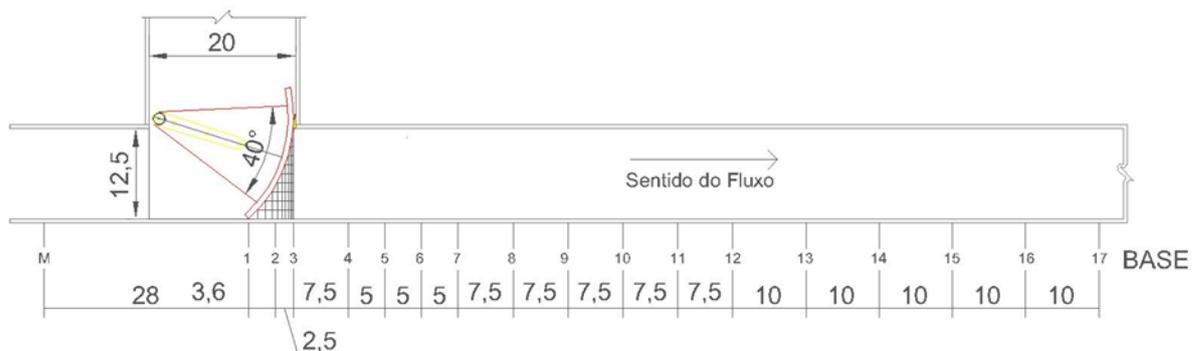
Vazão l/s	Abertura							
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
2	x	x	x	x	x	x	x	x
2.8	x	x	x	x	x	x	x	x
3.2	x	x	x	x	x	x	x	x
3.9	x	x	x	x	x	x	x	x
5	x	x	x	x	x	x	x	x
5.7	x	x	x	x	x	x	x	x
7.1	x	x	x	x	x	x	x	x
10.6		x	x	x	x	x	x	x
14.1			x	x	x	x	x	x
15.9			x	x	x	x	x	x
19.8			x	x	x	x	x	x
23			x	x	x	x	x	x
27.4				x	x	x	x	x
31.8				x	x	x	x	x

(fonte: elaborada pelo autor)

4.2 MEDIÇÕES DE PRESSÃO

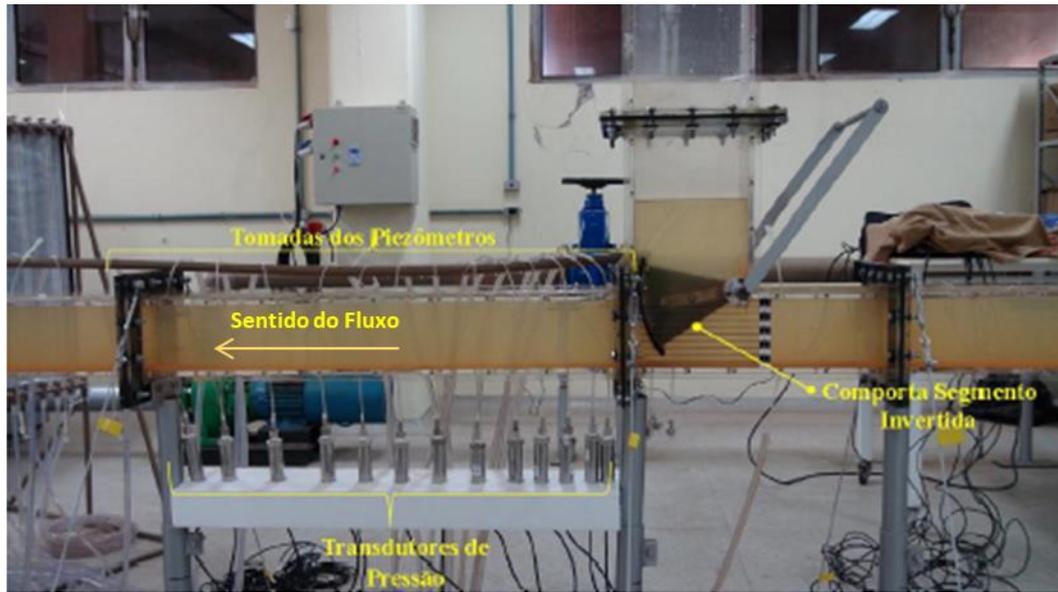
As pressões médias nos modelos foram registradas com a utilização de piezômetros, instalados ao longo do comprimento a jusante das comportas, na base dos condutos (figura 26 e 27), os dados das pressões instantâneas foram obtidos com transdutores de pressão instalados nos mesmos pontos que estavam anteriormente inseridos os piezômetros. A montante das comportas também foi instalado um piezômetro na base no conduto, para tornar possível a determinação da perda de carga singular.

Figura 26 – Disposição das tomadas de pressão na base do conduto, medidas em cm, UFPel



(fonte: Priebe, 2016)

Figura 27 – Transdutores de pressão instalados na base do conduto, UFPel



(fonte: adaptado de Abreu, 2014)

Os transdutores utilizados, conforme figura 27, são equipamentos que convertem uma grandeza física em sinal elétrico (tensão ou corrente). Os transdutores de pressão têm como elemento sensível uma membrana que, ao ser defletida pela pressão atuante sobre ela, ocasiona alteração na resistência elétrica do circuito embarcado, alterando o sinal de resposta do equipamento excitado eletricamente (Dai Prá, 2011).

Nos ensaios realizados no LOH, para cada condição de ensaio (vazão e abertura de comporta), foram adquiridos dados durante 10 minutos com frequência de 512 Hz. Nos ensaios realizados na UFPel, as pressões flutuantes foram coletadas com frequência de 200Hz durante 10 minutos. Os dados foram coletados simultaneamente para todas as tomadas de pressão e para cada condição de ensaio, os tempos e as frequências para a aquisição dos dados, citados anteriormente, foram escolhidos de maneira que permitisse uma coleta representativa sem interferência dos resultados a serem gerados.

As tabelas 3 e 4 mostram a posição das tomadas de pressão na base em relação à borda da comporta, estando a mesma completamente fechada, e a faixa de operação dos transdutores instalados nos modelos. Os transdutores instalados no modelo reduzido do LOH são da marca Sitron e possuem precisão de 0.30% em relação ao fundo de escala, os transdutores instalados no modelo reduzido da UFPel são da marca ZURICH, modelo PSI.420, precisão de 0.1% em relação ao fundo de escala.

Tabela 3 – Faixa de operação dos transdutores de pressão da base do conduto UFPel

Tomada de pressão	Faixa de operação	Distância a partir do batente da comporta (cm)
1	-1 a 3 m.c.a	0
2	-1 a 3 m.c.a	3.6
3	-1 a 1 m.c.a	6.1
4	-1 a 1 m.c.a	13.6
5	-1 a 1 m.c.a	18.6
6	-1 a 1 m.c.a	23.6
7	-1 a 1 m.c.a	28.6
8	-1 a 1 m.c.a	36.1
9	-1 a 1 m.c.a	43.6
10	-1 a 1 m.c.a	51.1
11	-1 a 1 m.c.a	58.6
12	0 a 2 m.c.a	66.1
13	0 a 2 m.c.a	76.1
14	0 a 2 m.c.a	86.1
15	-0.5 a 0.5 m.c.a	96.1
16	-0.5 a 0.5 m.c.a	106.1

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 4 – Faixa de operação dos transdutores de pressão da base do conduto LOH

Tomada de pressão	Faixa de operação	Distância a partir do batente da comporta (cm)
1	-1.5 a 1.5 m.c.a.	0
2	-1.5 a 1.5 m.c.a.	9.6
3	-1.5 a 1.5 m.c.a.	19.6
4	-1.5 a 1.5 m.c.a.	24.6
5	-1.5 a 1.5 m.c.a.	29.6
6	-1.5 a 1.5 m.c.a.	39.6
7	-1.5 a 1.5 m.c.a.	44.6
8	-1.5 a 1.5 m.c.a.	65.8
9	-1.5 a 1.5 m.c.a.	75.8
10	-1.5 a 1.5 m.c.a.	85.8
11	-1.5 a 1.5 m.c.a.	105.8
12	-1.5 a 1.5 m.c.a.	126.0
13	-1.5 a 1.5 m.c.a.	166.0
14	-1.5 a 1.5 m.c.a.	186.4
15	-1.5 a 1.5 m.c.a.	206.4

(fonte: elaborada pelo autor)

4.3 MEDIÇÕES DE VAZÃO

O modelo UFPel possui dois medidores de vazão (conforme figura 25), sendo estes dois medidores eletromagnéticos de vazão do mesmo modelo, IFC100C, acoplados a conversores de sinal Optiflux KC2000C/6 da marca Krohne, um de precisão de 0.01 l/s no circuito de baixas vazões, e outro para altas vazões cuja precisão é de 0.1 l/s. Instalados conforme recomendação do fabricante.

O modelo LOH possui um medidor de vazão, sendo este um macromedidor eletromagnético de vazão da marca Rosemount, diâmetro 250 mm, faixa de medição de 15.56 l/s a 465.28 l/s. A precisão na leitura é de $\pm 0.5\%$ do índice de 0.3 a 10 m/s, abaixo de 0.3 m/s o sistema tem precisão de ± 0.0015 m/s.

4.4 ESCALAS DE TRANSPOSIÇÃO

A semelhança dinâmica é apropriada para modelar fluxos acionados por gravidade nos quais as forças viscosas são desprezíveis em presença das demais forças atuantes, portanto, a semelhança dinâmica é o método apropriado para garantir que o comportamento do fluxo no modelo seja análogo ao fluxo no protótipo. A semelhança dinâmica requer que a razão entre as forças inerciais e as forças gravitacionais ($\rho g L^3$) no modelo seja igual à do protótipo (Hammack, 2019). Essa relação é geralmente expressa como o número de Froude (fórmula 18).

A semelhança dinâmica e os números de Reynolds grandes o suficiente para produzir efeitos viscosos desprezíveis, reproduz com precisão linhas de fluxo e, portanto, as acelerações de fluidos e as forças hidrodinâmicas. Os efeitos viscosos que afetam as forças na comporta são pontos de separação de fluxo, e o local ao longo do conduto onde o fluxo passa ao longo de toda a altura do conduto é geralmente paralelo ao teto do conduto. Essas características de fluxo produzem zonas de baixa pressão na parte traseira das obstruções de fluxo, como em uma comporta parcialmente aberta que se projeta para o fluxo. Como o ponto de separação do fluxo é fixado no lábio inferior da comporta para todas as condições de fluxo, os efeitos viscosos são independentes da escala e da velocidade (Baines, 1954). A tabela 5 mostra o parâmetro hidráulico e sua respectiva relação de transposição para a escala de protótipo, e a tabela 6 mostra as vazões semelhantes ensaiadas nos modelos, assim como uma “vazão considerada” para que

seja possível comparar as pressões nos modelos reduzidos, esta foi obtida através de uma média entre as vazões semelhantes ensaiadas.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt[2]{g \cdot L}} \quad (\text{fórmula 18})$$

Sendo:

V – Velocidade;

g – Aceleração da gravidade;

L – Diâmetro hidráulico.

Tabela 5 – Relações de transposição por parâmetro hidráulico

Parâmetro Hidráulico	Dimensão em função do comprimento	Escala de transposição Modelo : Protótipo	
		LOH	UFPel
Comprimento	$L_r = L$	1 : 16	1 : 32
Área	$A_r = L_r^2$	1 : 256	1 : 1024
Tempo	$T_r = L_r^{0,5}$	1 : 4.000	1 : 5.657
Velocidade	$V_r = L_r^{0,5}$	1 : 4.000	1 : 5.657
Vazão	$Q_r = L_r^{2,5}$	1 : 1024.00	1 : 5792.62
Força	$F_r = L_r^3$	1 : 4096	1 : 32768
Pressão	$P_r = L_r$	1 : 16	1 : 32

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 6 – Vazões semelhantes ensaiadas, e vazão considerada

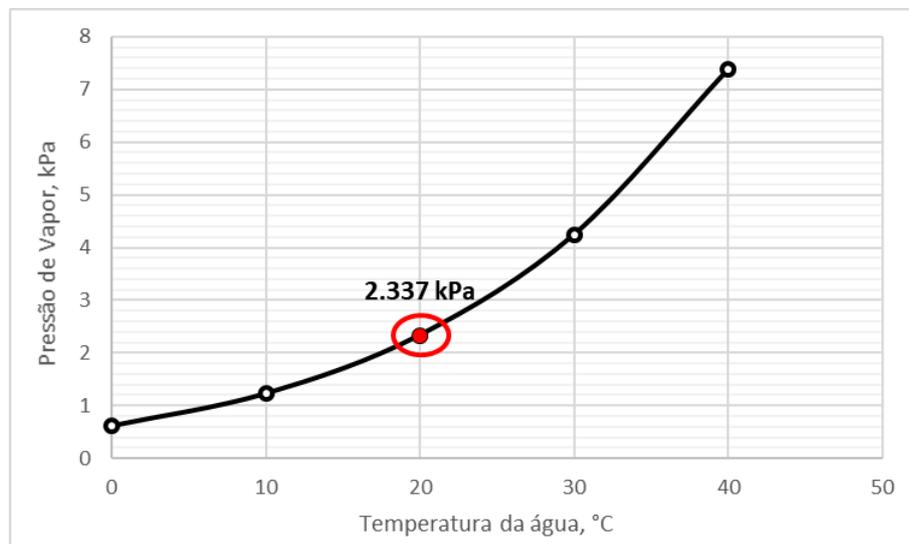
Vazão de Modelo (l/s)		Vazão de Protótipo (m³/s)			Abertura da Comporta (%)							
LOH	UFPeI	LOH	UFPeI	Considerada	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
	2.00		11.59									
	2.80		16.22									
	3.20		18.54									
22.00	3.90	22.53	22.59	22.56	x	x	x	x	x	x	x	x
	5.00		28.96									
32.00	5.70	32.77	33.02	32.89	x	x	x	x	x	x	x	x
40.00	7.10	40.96	41.13	41.04		x	x	x	x	x	x	x
60.00	10.60	61.44	61.40	61.42		x	x	x	x	x	x	x
80.00	14.10	81.92	81.68	81.80			x	x	x	x	x	x
	15.90		92.10									
	19.80		114.69									
	23.00		133.23									
	27.40		158.72									
	31.80		184.21									

(fonte: elaborada pelo autor)

4.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE CAVITAÇÃO

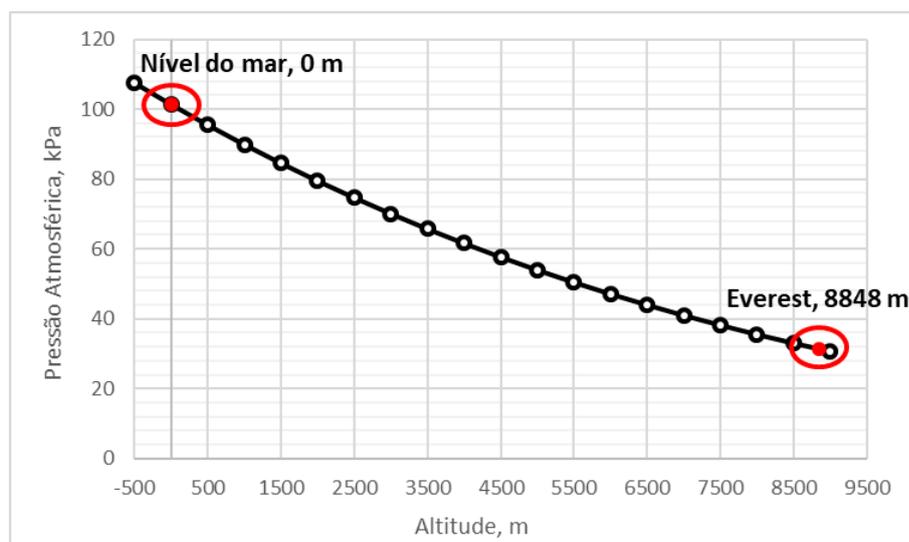
A determinação dos índices de cavitação foi realizada conforme a fórmula 17, sendo necessária a disposição dos parâmetros de entrada. A pressão de vapor d'água (figura 28) varia com a temperatura da água, para o presente trabalho foi considerada a temperatura de 20 °C (2.337 kPa). A pressão atmosférica (figura 29) varia com a altitude, para o presente trabalho foi considerada a nível do mar, 0 m (101.35 kPa), pois os dois modelos reduzidos estão próximos ao nível do mar.

Figura 28 – Determinação da pressão de vapor



(fonte: adaptado de White, 2002)

Figura 29 – Determinação da pressão atmosférica, destaque para a variação em grandes altitudes



(fonte: adaptado de White, 2002)

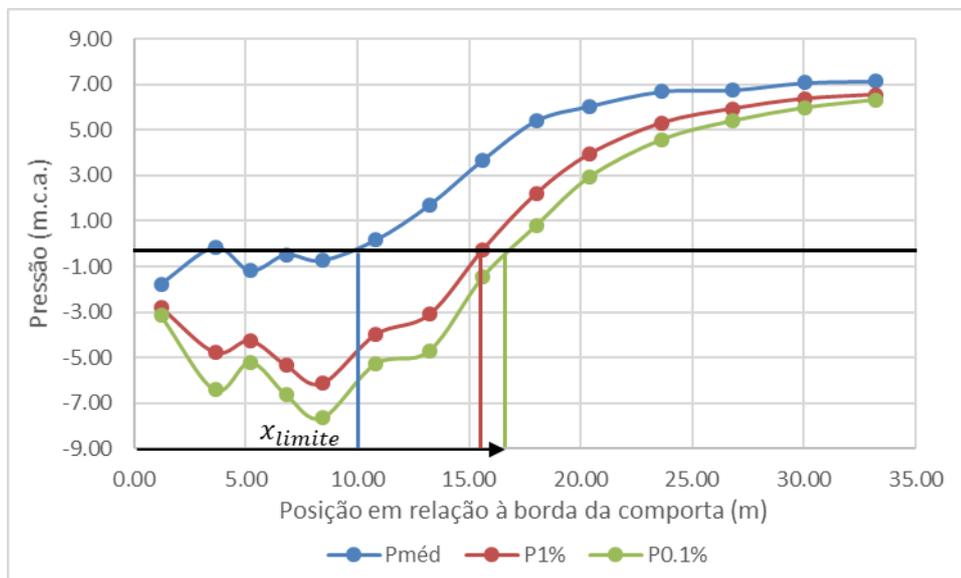
Os valores de pressão e velocidade na veia contraída foram obtidos com base nos ensaios realizados (considerando que o ponto de menor pressão medido na base, próximo à comporta, foi o ponto de maior contração do jato).

4.6 DETERMINAÇÃO DO COMPRIMENTO LIMITE

O comprimento limite (x_{limite}) é o ponto a jusante da comporta até onde ocorrerão os danos para a condição inicial de cavitação, sendo que esta condição varia para cada abertura. Após determinado o valor de pressão na veia contraída que iniciaria o dano, os valores inferiores a esta pressão em qualquer ponto do conduto são considerados como zonas cavitantes.

A figura 30 mostra a metodologia utilizada para encontrar o valor de x_{limite} , sendo este um valor de grande importância para que se possa estimar a zona cavitante, na figura 30 também foram inseridas as curvas das pressões com probabilidade de não excedência de 0.1% e 1% abordadas neste trabalho.

Figura 30 – Determinação do x_{limite}



(fonte: elaborada pelo autor)

Utilizando os valores de índice de cavitação críticos citados por Brighetti (1988), foi calculada a vazão em que o índice de cavitação seria atingido, sendo esta chamada de vazão crítica. A linha contínua que corta o gráfico (figura 30) em -0.32 m.c.a. é o valor da pressão que ocorre

na veia contraída para tal abertura e sua respectiva vazão crítica, sendo assim, determinados os valores do comprimento limite para $P_{\text{méd}}$, $P1\%$ e $P0.1\%$.

A determinação da vazão crítica se dá através do cálculo do índice de cavitação nos pontos ensaiados e a aplicação do critério citado por Brighetti (1988), em que os índices de cavitação críticos variam entre 0.4 e 0.6, e os maiores problemas com cavitação estariam próximos da abertura de 60%.

4.7 PARÂMETRO ADIMENSIONAL UTILIZADO

Com o x_{limite} identificado para cada condição de ensaio, foi determinado um parâmetro adimensional de posição proposto por Sell (2018), denominado $\Pi_{\text{posição}}$, composto pela relação entre x_{limite} e a altura da área abaixo da comporta para uma dada abertura, a , conforme orienta a fórmula 19.

$$\Pi_{\text{posição}} = \left(\frac{x_{\text{limite}}}{a} \right) \quad (\text{fórmula 19})$$

Foi empregado também um parâmetro adimensional proposto por Sell (2018), composto pela relação entre perda de carga (hf) verificada na comporta, a vazão (Q) e a viscosidade cinemática da água (ν), gerando um parâmetro adimensional de operação, denominado de $\Pi_{\text{operação}}$ (fórmula 20).

$$\Pi_{\text{operação}} = \left(\frac{hf \cdot \nu}{Q} \right) \quad (\text{fórmula 20})$$

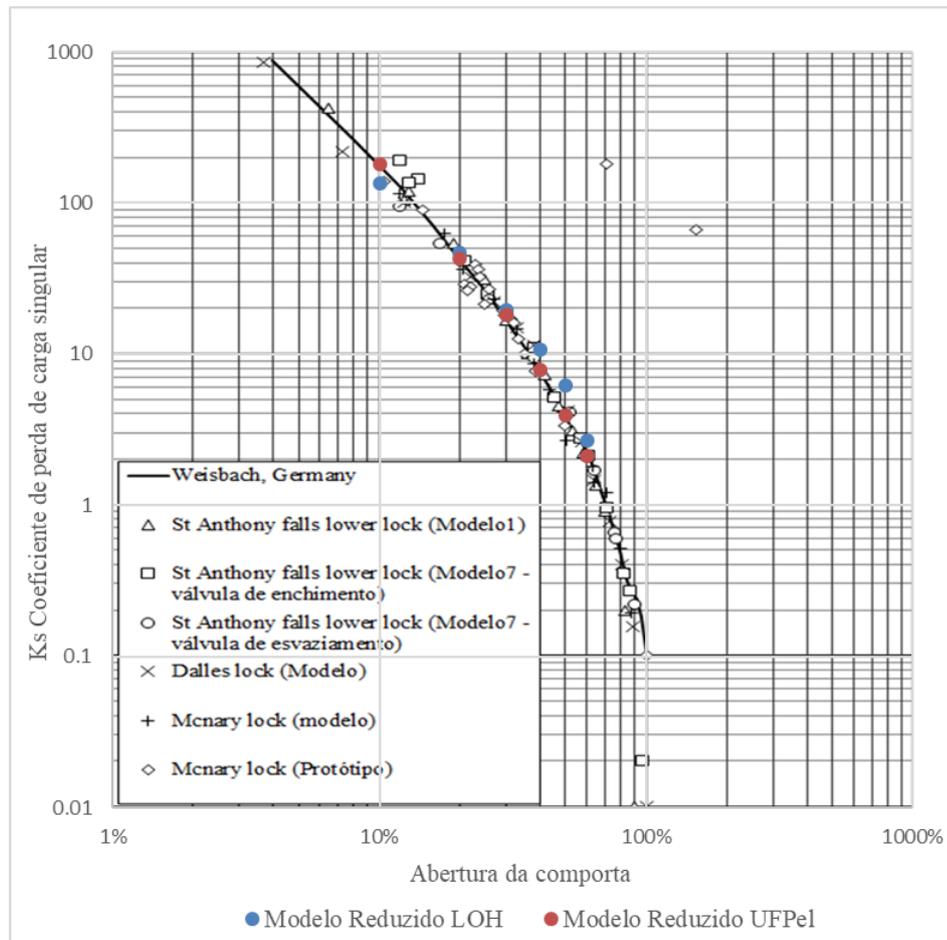
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo é destinado à apresentação dos resultados obtidos nos ensaios de laboratório, por meio de gráficos e das fórmulas abordadas. Serão apresentados os resultados para a perda de carga singular, comportamento das pressões médias ($P_{méd}$), pressões com probabilidade 1 % ($P_{1\%}$) e 0.1 % ($P_{0.1\%}$) de serem inferiores a um determinado valor e análise dos índices de cavitação a jusante da comporta.

5.1 COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA SINGULAR

A determinação do coeficiente de perda de carga singular (K_s) foi realizada com a utilização da fórmula 5, comparando com outros valores obtidos em bibliografia para comporta segmento invertida, conforme figura 31.

Figura 31 – Coeficiente de perda de carga singular por abertura



(fonte: editada pelo autor, adaptado de USACE, 2018)

Os valores calculados para o coeficiente de perda de carga singular (K_s) para os dois modelos se aproximaram bastante da curva obtida em bibliografia para diversos modelos e condições de abertura da comporta.

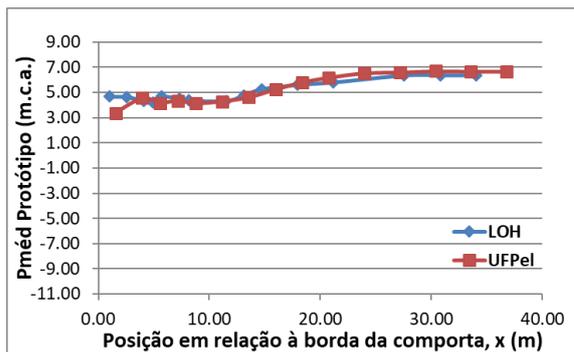
Nenhum ponto obtido ficou demasiadamente distanciado da curva, conforme ocorreu, por exemplo, no protótipo de McNary na abertura de 70%.

5.2 PRESSÕES MÉDIAS EM ESCALA DE PROTÓTIPO

Os modelos reduzidos foram ensaiados em vazões de protótipo semelhantes para que seja possível uma comparação das pressões, conforme mostrado na tabela 6. Utilizando as relações de transposição atribuídas na tabela 5, foram obtidos os gráficos (figura 32 a 47), calculados com as pressões médias na base dos condutos (medição com piezômetros) e a posição em relação à borda da comporta.

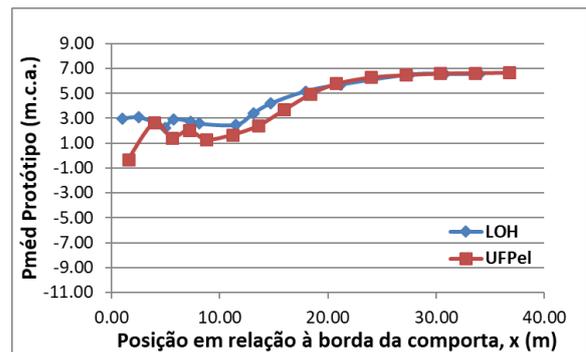
As linhas são interpolações entre os pontos ensaiados, sendo estes identificados no gráfico, a curva na cor vermelha representa os dados transpostos da UFPel e a curva na cor azul representa os dados transpostos do LOH.

Figura 32 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 22.56 m³/s



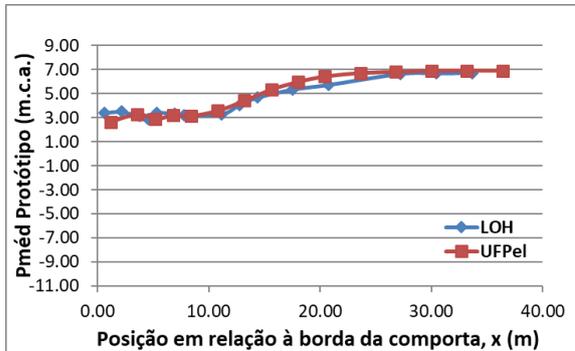
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 33 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 32.89 m³/s



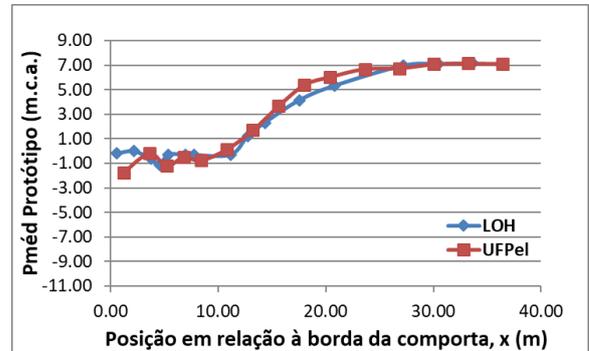
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 34 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 41.04 m³/s



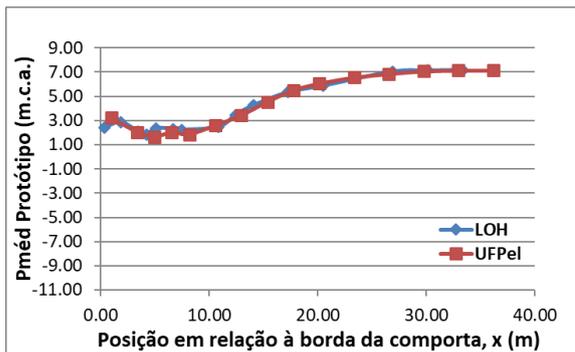
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 35 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



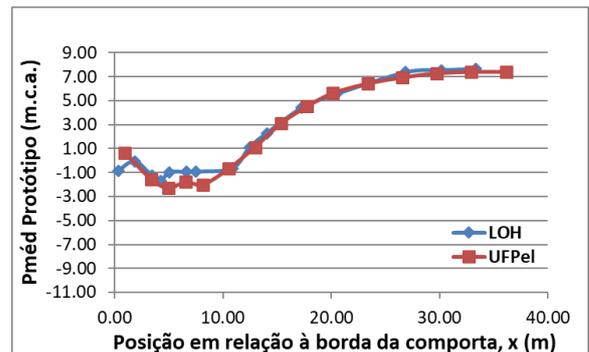
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 36 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



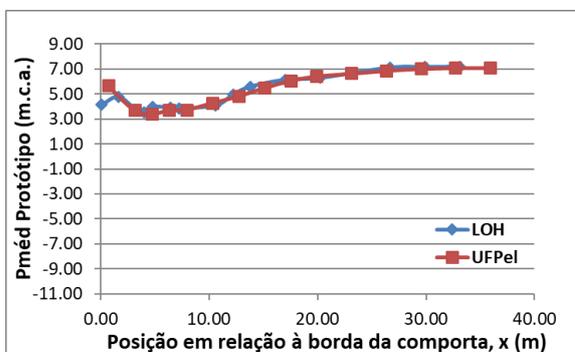
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 37 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



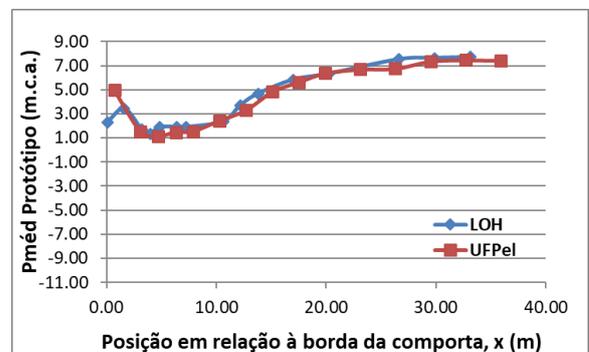
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 38 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



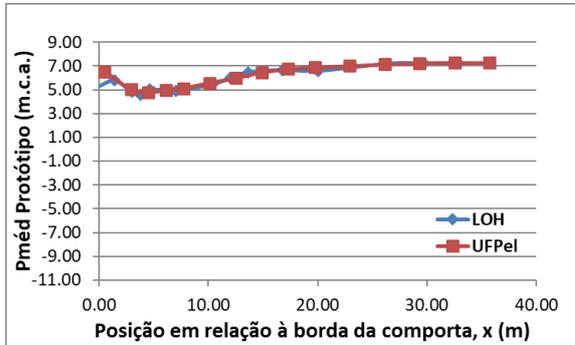
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 39 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



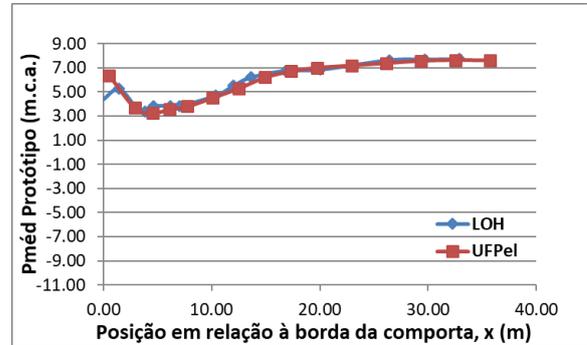
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 40 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



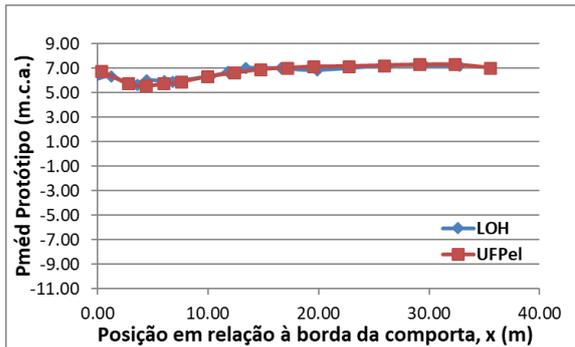
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 41 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



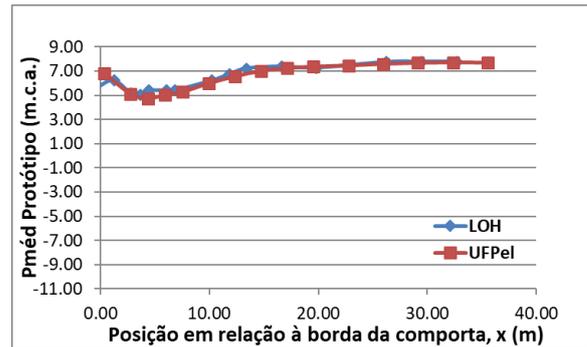
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 42 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 43 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 44 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 61.42 m³/s

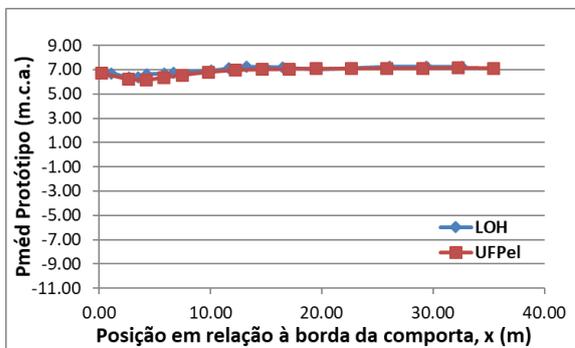


Figura 45 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 81.80 m³/s

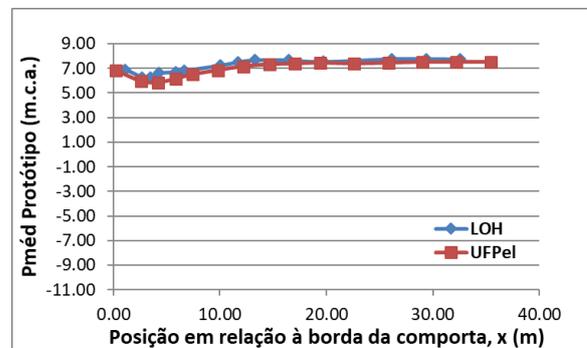
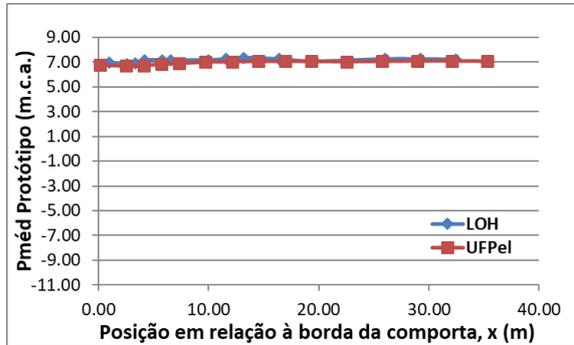
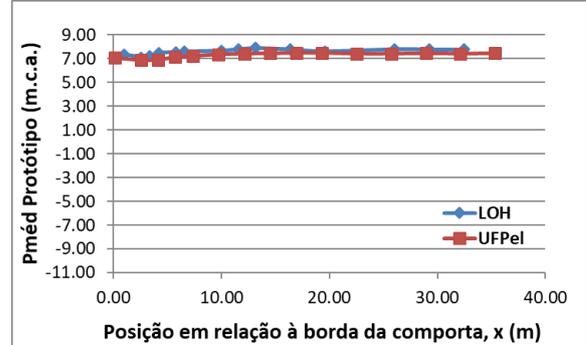


Figura 46 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 47 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

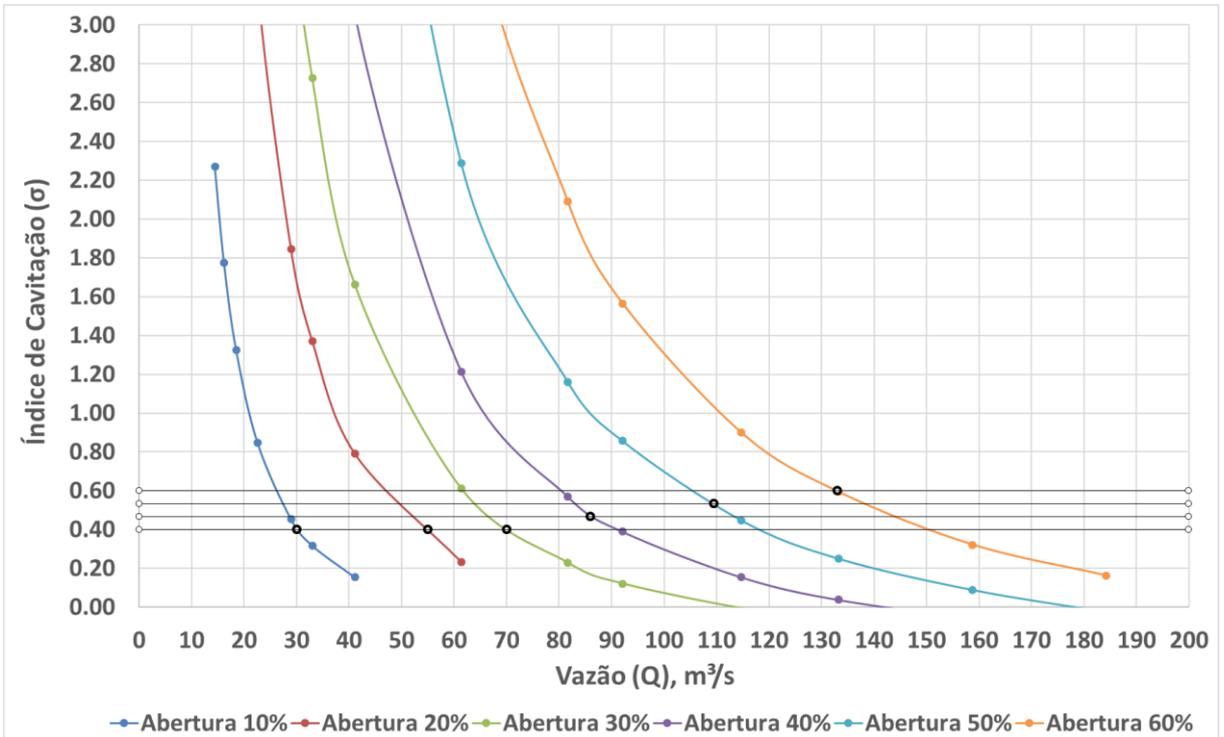
Os valores dos gráficos resultantes utilizando as relações de semelhança, nas vazões de protótipo consideradas, mostram que o comportamento das pressões médias a jusante da comporta para os dois modelos é semelhante. Entretanto nota-se nas pequenas aberturas da comporta uma diferença mais significativa nas primeiras tomadas logo a jusante da comporta.

Sabendo que as forças de downpull são significativas em pequenas aberturas, como na de 10%, e afetadas pelo lábio da comporta, a hipótese adotada para explicar a diferença de pressão média entre os modelos reduzidos nos primeiros pontos a jusante da comporta em pequenas aberturas, é de que o fluxo em pequenas aberturas é muito afetado por pequenas variações na geometria do lábio da comporta.

5.3 VAZÃO CRÍTICA

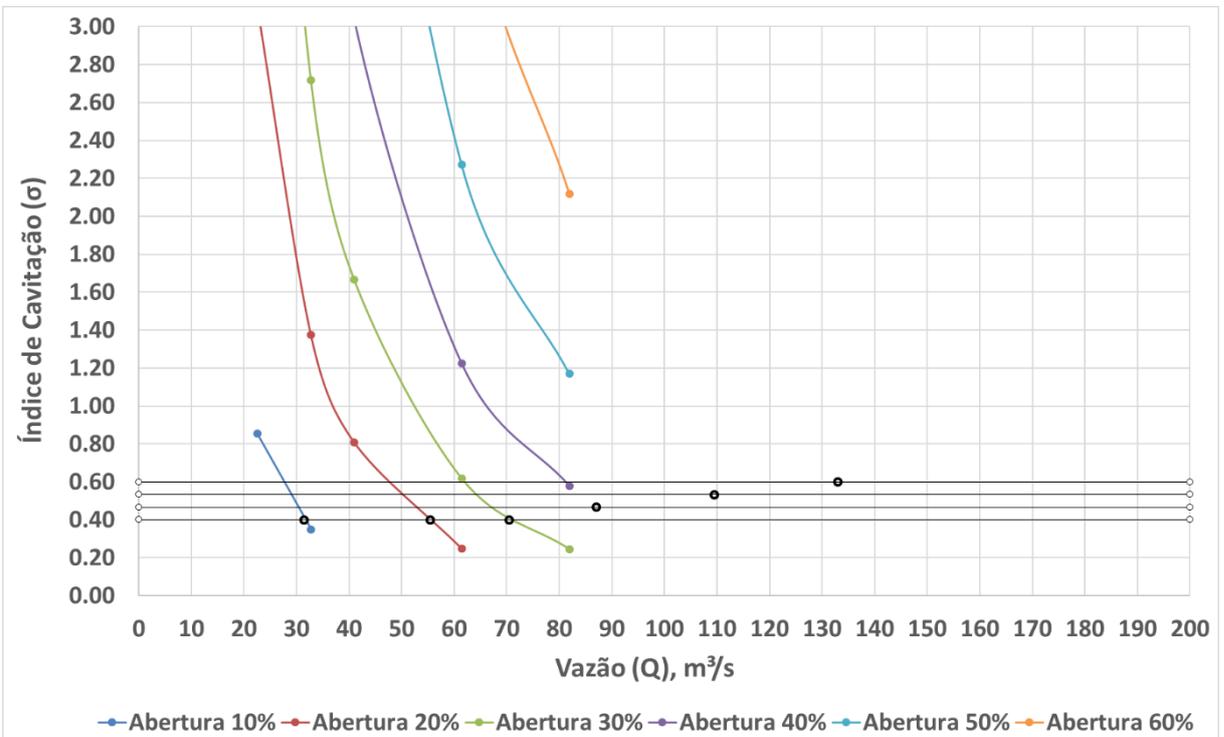
A determinação da vazão crítica, utilizando o critério citado por Brighetti (1988), está assinalada na figura 48, que mostra os resultados obtidos para UFPel e a figura 49 que mostra os resultados obtidos para LOH.

Figura 48 – Índices de Cavitação UFPel, determinação da vazão crítica



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 49 – Índices de Cavitação LOH, determinação da vazão crítica



(fonte: elaborada pelo autor)

Os valores das vazões críticas em protótipo obtidas em ambos os modelos estão na tabela 7, para o LOH, apenas foram atingidas vazões críticas até a abertura de 30%, pois os ensaios realizados não atingiram os valores necessários para início do fenômeno de cavitação.

Tabela 7 – Vazões críticas em protótipo

Abertura	Vazão Crítica, LOH m ³ /s	Vazão Crítica UFPel, m ³ /s
10%	31.50	30.00
20%	55.50	55.00
30%	70.50	70.00
40%	Não atingida	86.00
50%	Não atingida	109.50
60%	Não atingida	133.00

(fonte: elaborada pelo autor)

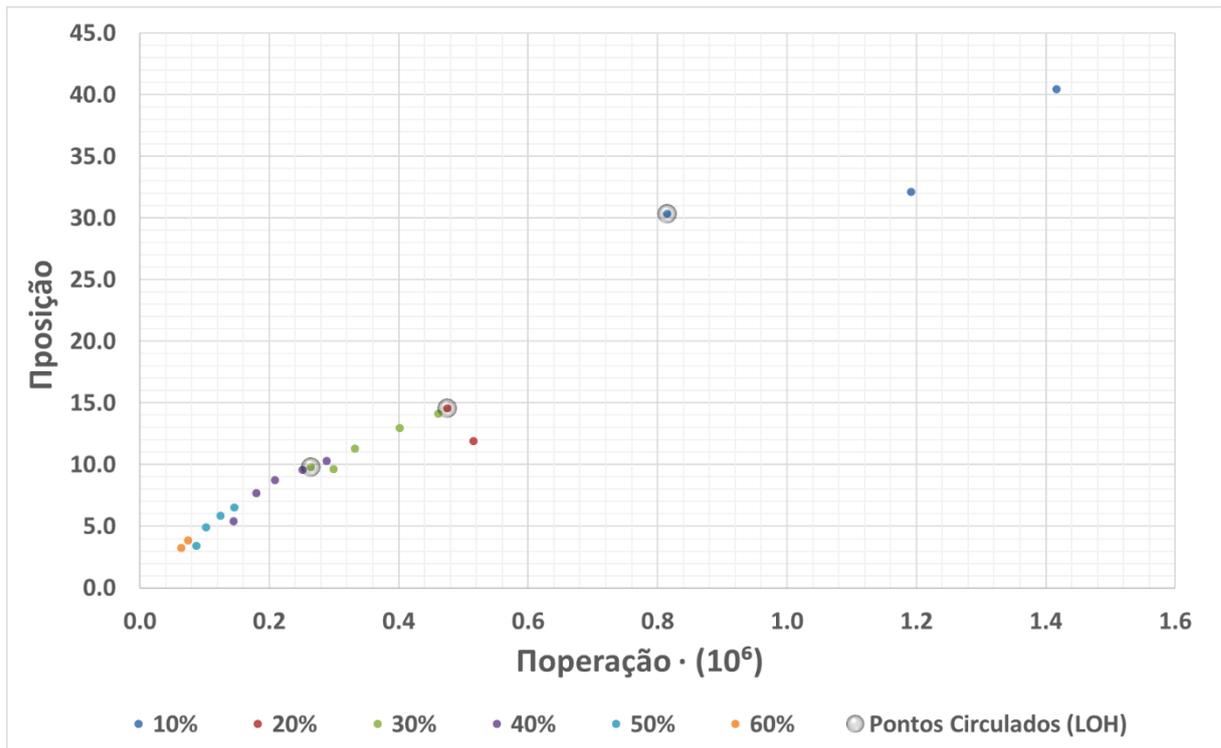
Os valores obtidos para a vazão crítica em protótipo de cada abertura da comporta ficaram significativamente próximos, analisando os valores obtidos para cada um dos dois modelos reduzidos. Pressupõem-se que as vazões críticas em protótipo, não atingidas nos ensaios do modelo reduzido do LOH, também estariam próximas as vazões críticas obtidos no modelo da UFPel, extrapolando as curvas obtidas.

5.4 PARÂMETRO ADIMENSIONAL

A partir os valores de vazão crítica obtidos foi estimado, separadamente para cada modelo, a pressão na veia contraída (menor pressão da base) que ocorre para a vazão crítica e estes valores considerados como valores que não poderiam ser ultrapassados na determinação do x_{limite} , conforme explicado no item 4.6.

A figura 50 mostra os parâmetros adimensionais obtidos para os dois modelos, os pontos calculados para o LOH estão circulados para destacar que se trata de valores obtidos com dados de dois diferentes modelos reduzidos, inseridos no mesmo gráfico para comparação e análise.

Figura 50 – Adimensionais calculados



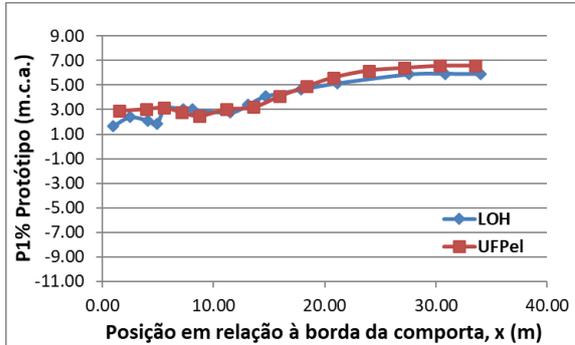
(fonte: elaborada pelo autor)

Analisando o gráfico dos adimensionais calculados (figura 50), nota-se que houve um bom agrupamento dos dados, para os dois modelos reduzidos, sendo possível até mesmo descrever o comportamento através de uma equação de uma reta. O que valida a hipótese de que este conjunto adimensional tende a ser de possível aplicação em futuros trabalhos, projetos e prevenção de danos por cavitação.

5.5 PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 1%

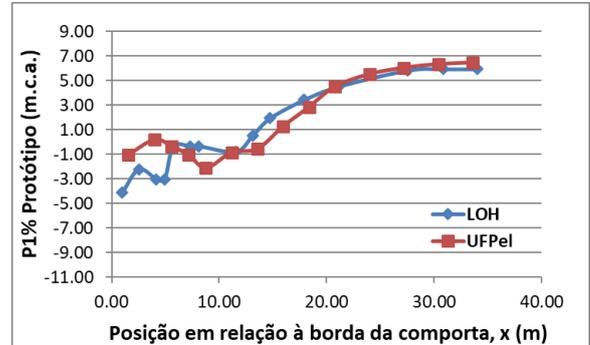
As mesmas vazões ensaiadas com piezômetros foram ensaiadas com os transdutores de pressão, os valores obtidos para a probabilidade de não excedência de 1% são importantes, pois mostram pressões com menor probabilidade de ocorrência, porém com maior potencial de causar danos por cavitação nos condutos. As figuras de 51 a 66, mostram os valores obtidos utilizando a transposição da tabela 5 e as vazões consideradas da tabela 6, tornando possível a análise e comparação dos valores obtidos para valores com uma dada determinada possibilidade de ocorrência em modelos semelhantes e escalas diferentes, a curva na cor vermelha representa os dados transformados da UFPel e a curva na cor azul representa os dados transformados do LOH.

Figura 51 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 22.56 m³/s



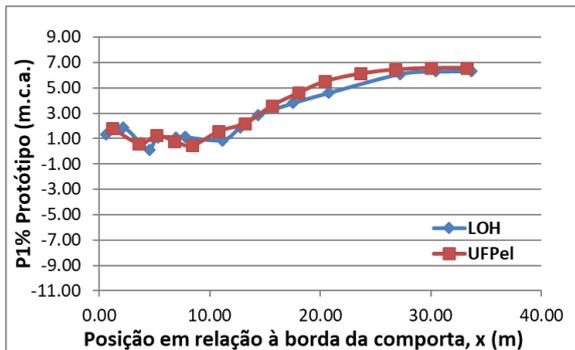
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 52 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 32.89 m³/s



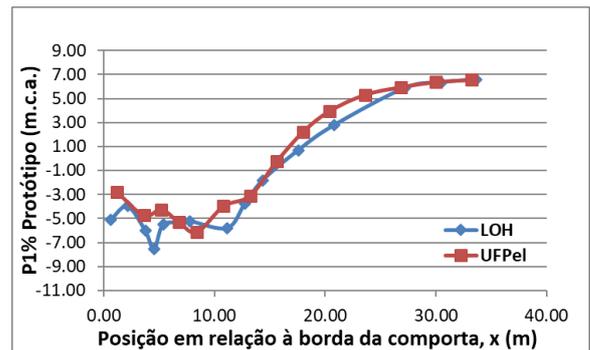
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 53 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 41.04 m³/s



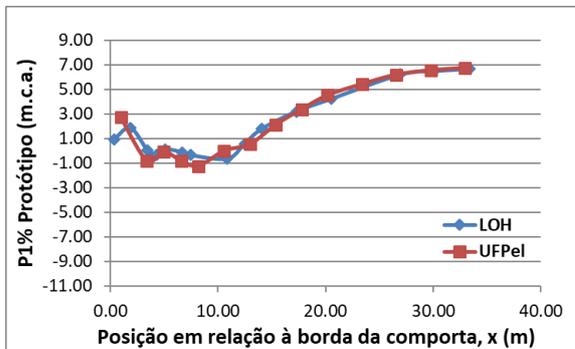
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 54 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



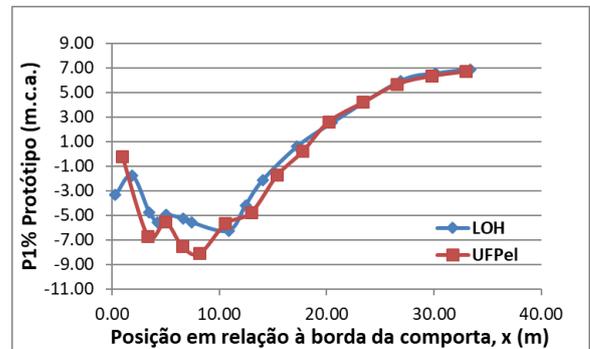
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 55 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



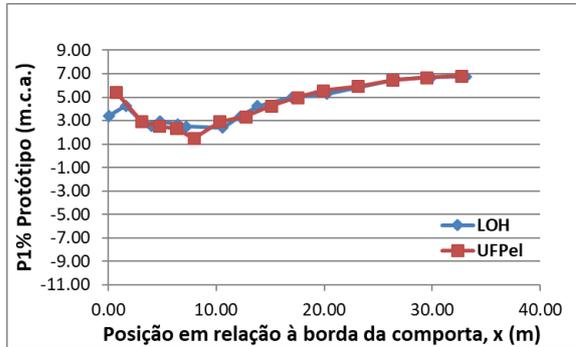
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 56 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



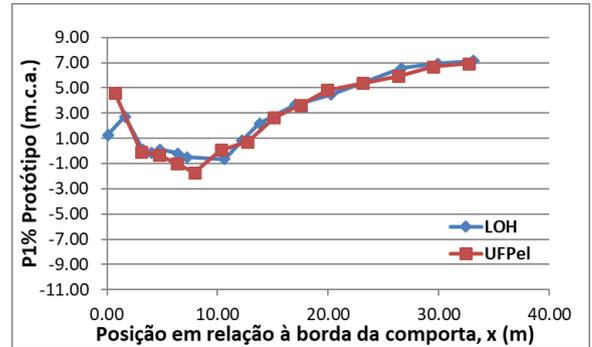
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 57 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



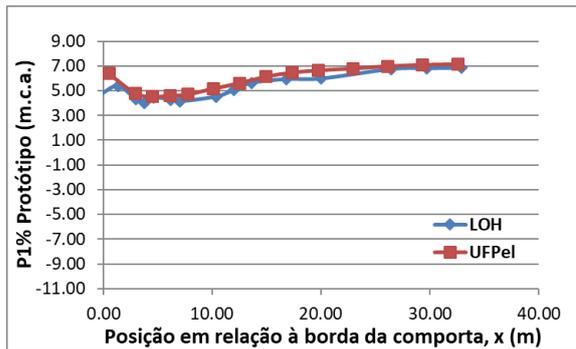
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 58 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



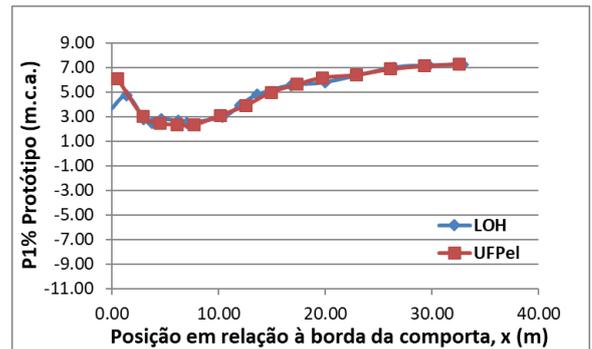
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 59 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



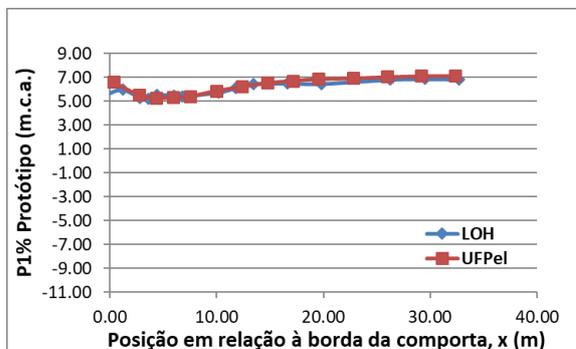
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 60 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



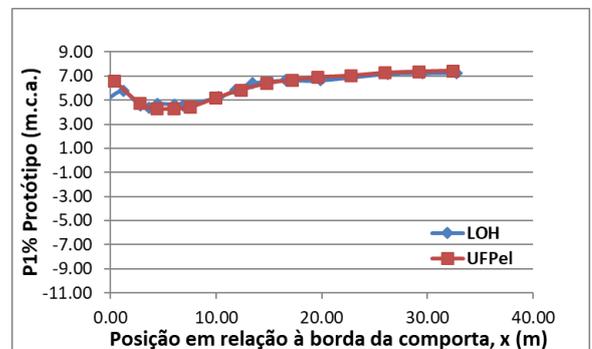
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 61 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



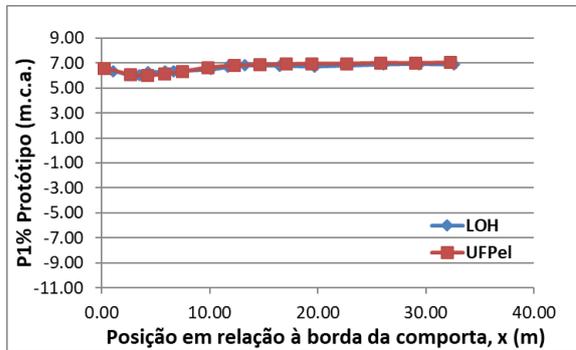
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 62 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



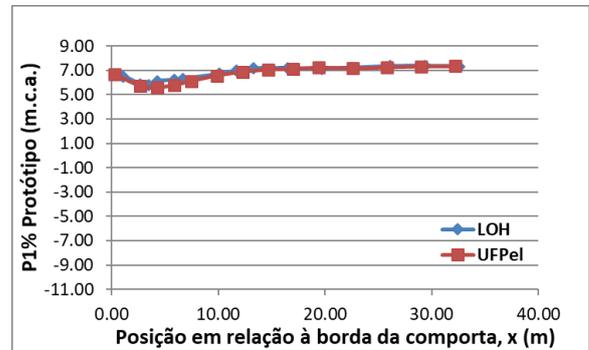
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 63 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



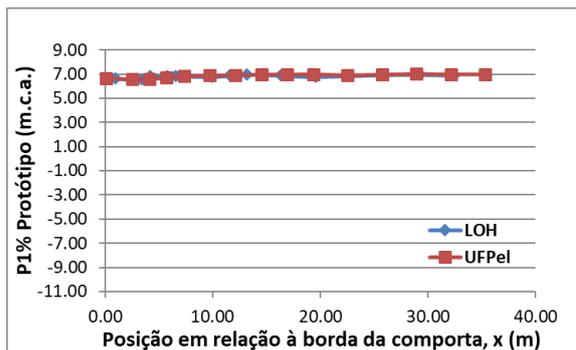
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 64 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



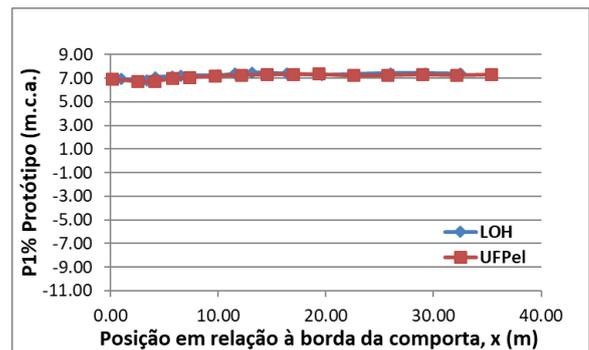
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 65 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 66 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



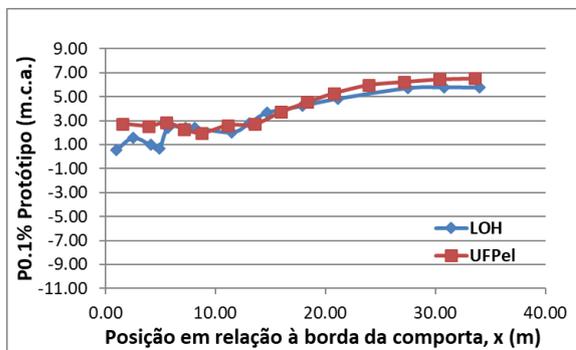
(fonte: elaborada pelo autor)

Para as pressões com probabilidade de não excedência de 1% foram encontrados resultados que indicam valores de ordem semelhante, a partir da abertura da comporta de 60% até 80% os valores dos gráficos ficam praticamente sobrepostos. Nas aberturas menores, conforme esperado, devido aos efeitos causados pela geometria do lábio da comporta, as pressões têm comportamento um pouco distinto nas primeiras tomadas a jusante da comporta, mas com ordem de grandeza semelhantes.

5.6 PRESSÕES COM PROBABILIDADE DE NÃO EXCEDÊNCIA DE 0.1%

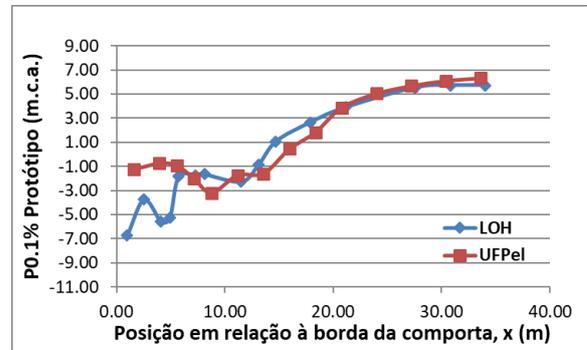
Também foram analisadas as pressões com probabilidade de não excedência de 0.1%, pressões com ainda menor probabilidade de ocorrência, porém com maior potencial de causar danos por cavitação. As figuras de 67 a 82, mostram os dados em escala de protótipo, a curva na cor vermelha representa os dados transpostos da UFPel e a curva na cor azul representa os dados transpostos do LOH.

Figura 67 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 22.56 m³/s



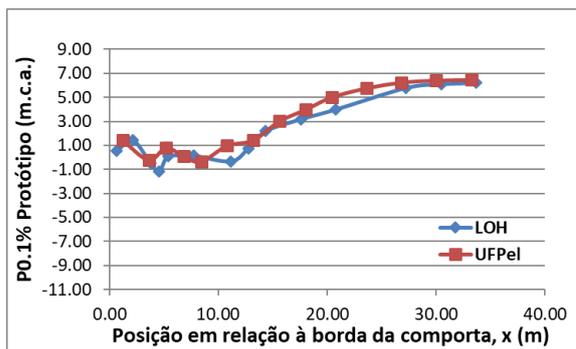
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 68 – Abertura da comporta 10% e vazões consideradas de 32.89 m³/s



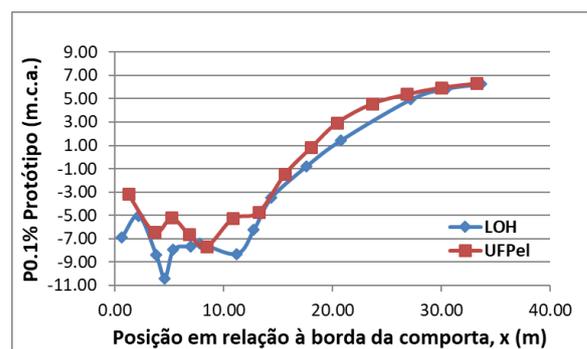
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 69 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 41.04 m³/s



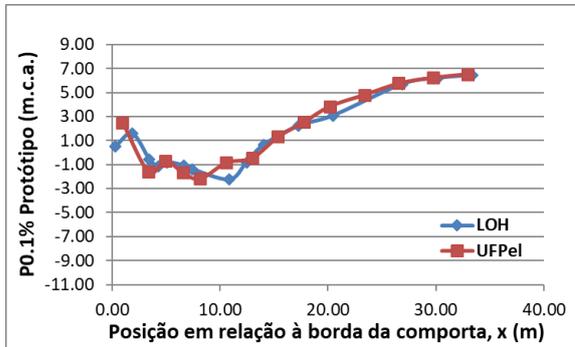
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 70 – Abertura da comporta 20% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



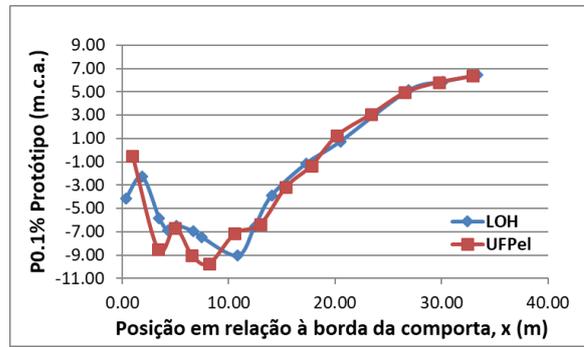
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 71 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



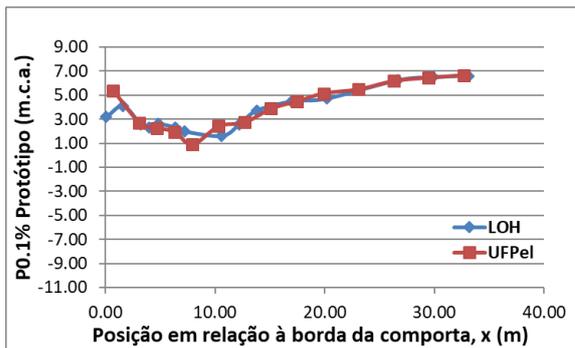
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 72 – Abertura da comporta 30% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



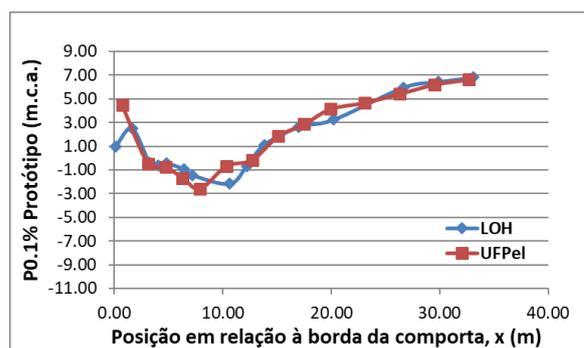
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 73 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



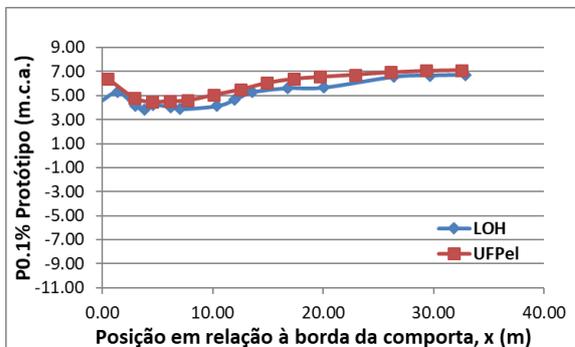
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 74 – Abertura da comporta 40% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



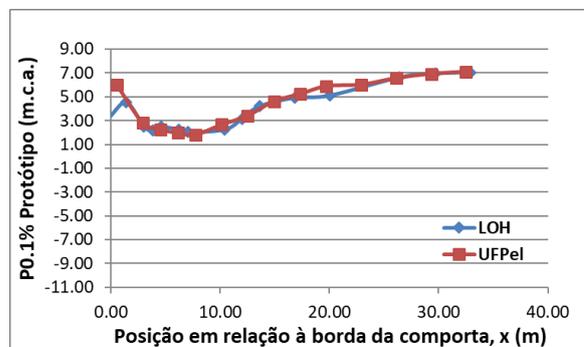
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 75 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



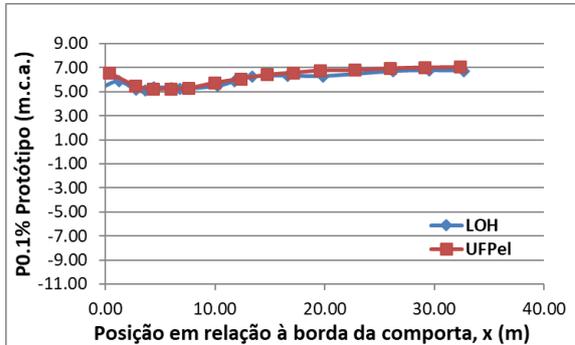
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 76 – Abertura da comporta 50% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



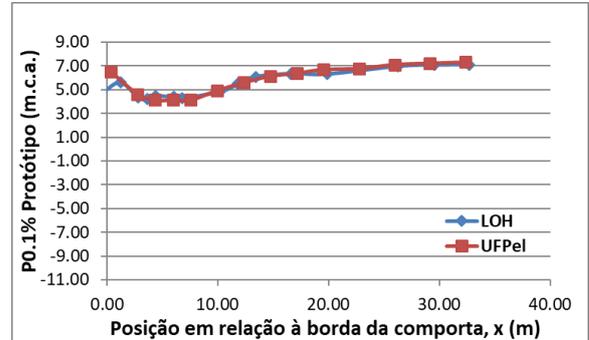
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 77 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



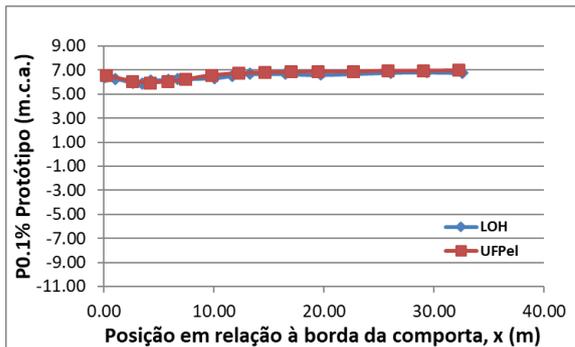
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 78 – Abertura da comporta 60% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



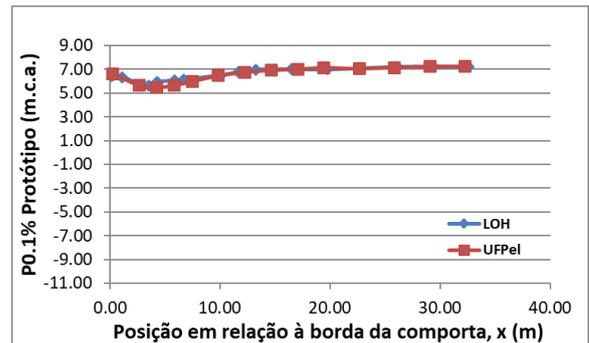
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 79 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



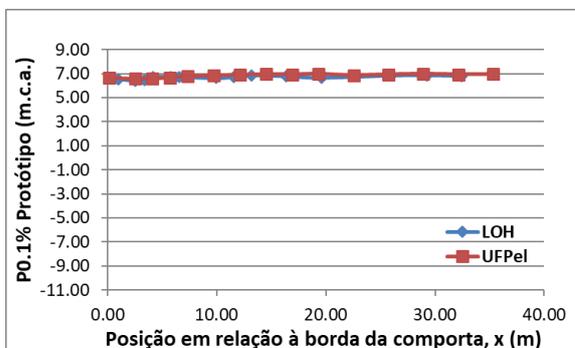
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 80 – Abertura da comporta 70% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



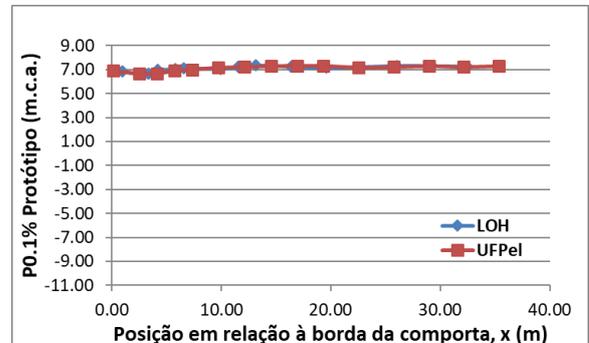
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 81 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 61.42 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 82 – Abertura da comporta 80% e vazões consideradas de 81.80 m³/s



(fonte: elaborada pelo autor)

Nas pressões com probabilidade de não excedência de 0.1%, o comportamento das pressões obedece ao mesmo comportamento das pressões com probabilidade de não excedência de 1%, apenas acentuando os picos de pressão, as curvas geradas e a distância entre elas se mantêm praticamente constantes para todas as aberturas.

5.7 COMPRIMENTO LIMITE

O comprimento limite (x_{limite}) calculado é um parâmetro importante, pois com ele é possível estimar para cada vazão e abertura da comporta, o ponto até onde há possibilidade de danos, sabendo disto serão apresentados os comprimentos limites. As tabelas de 8 a 13 apresentam os valores de x_{limite} obtidos neste trabalho para os dois modelos reduzidos, com eles é possível estimar onde o conduto deve ser reforçado, em caso de não ser possível evitar vazões superiores às críticas.

Tabela 8 – Valores de x_{limite} obtidos para a abertura de 10%

		x_{limite} (m)			
		Vazão Prot. m ³ /s	P _{méd}	P1%	P0.1%
UFPel		22.59	-	-	9.56
		28.96	-	15.45	16.47
		33.02	12.85	17.35	18.77
		41.13	16.18	19.81	20.70
		x_{limite} (m)			
		Vazão Prot. m ³ /s	P _{méd}	P1%	P0.1%
LOH		22.53	-	11.67	13.17
		32.77	12.14	16.63	18.35

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 9 – Valores de x_{limite} obtidos para a abertura de 20%

		x_{limite} (m)		
	Vazão Prot. m ³ /s	Pméd	P1%	P0.1%
UFPel	41.13	-	-	8.48
	61.40	9.52	15.55	16.81
		x_{limite} (m)		
	Vazão Prot. m ³ /s	Pméd	P1%	P0.1%
LOH	40.96	-	4.59	11.86
	61.44	11.65	16.88	18.94

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 10 – Valores de x_{limite} obtidos para a abertura de 30%

		x_{limite} (m)		
	Vazão Prot. m ³ /s	Pméd	P1%	P0.1%
UFPel	61.40	-	11.01	13.71
	81.68	11.59	17.57	19.08
	92.10	13.56	19.14	21.14
	114.69	15.55	20.79	23.55
	133.23	16.98	23.42	25.10
		x_{limite} (m)		
	Vazão Prot. m ³ /s	Pméd	P1%	P0.1%
LOH	61.44	-	11.94	13.76
	81.92	11.79	16.73	19.87

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 11 – Valores de x_{limite} obtidos para a abertura de 40%

		x_{limite} (m)		
	Vazão Prot. m ³ /s	Pméd	P1%	P0.1%
UFPel	81.68	-	12.08	13.58
	92.10	8.66	13.90	14.81
	114.69	12.35	17.26	18.82
	133.23	13.98	19.26	22.04
	158.72	15.33	21.83	24.26
	184.21	16.46	23.85	25.33

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 12 – Valores de x_{limite} obtidos para a abertura de 50%

	Vazão Prot. m ³ /s	x_{limite} (m)		
		Pméd	P1%	P0.1%
UFPel	92.10	-	-	8.01
	114.69	6.82	11.61	12.95
	133.23	9.82	13.78	14.69
	158.72	11.69	15.50	17.56
	184.21	13.02	17.44	19.03

(fonte: elaborada pelo autor)

Tabela 13 – Valores de x_{limite} obtidos para a abertura de 60%

	Vazão Prot. m ³ /s	x_{limite} (m)		
		Pméd	P1%	P0.1%
UFPel	133.23	-	8.44	9.43
	158.72	7.86	10.71	11.66
	184.21	9.27	12.13	13.09

(fonte: elaborada pelo autor)

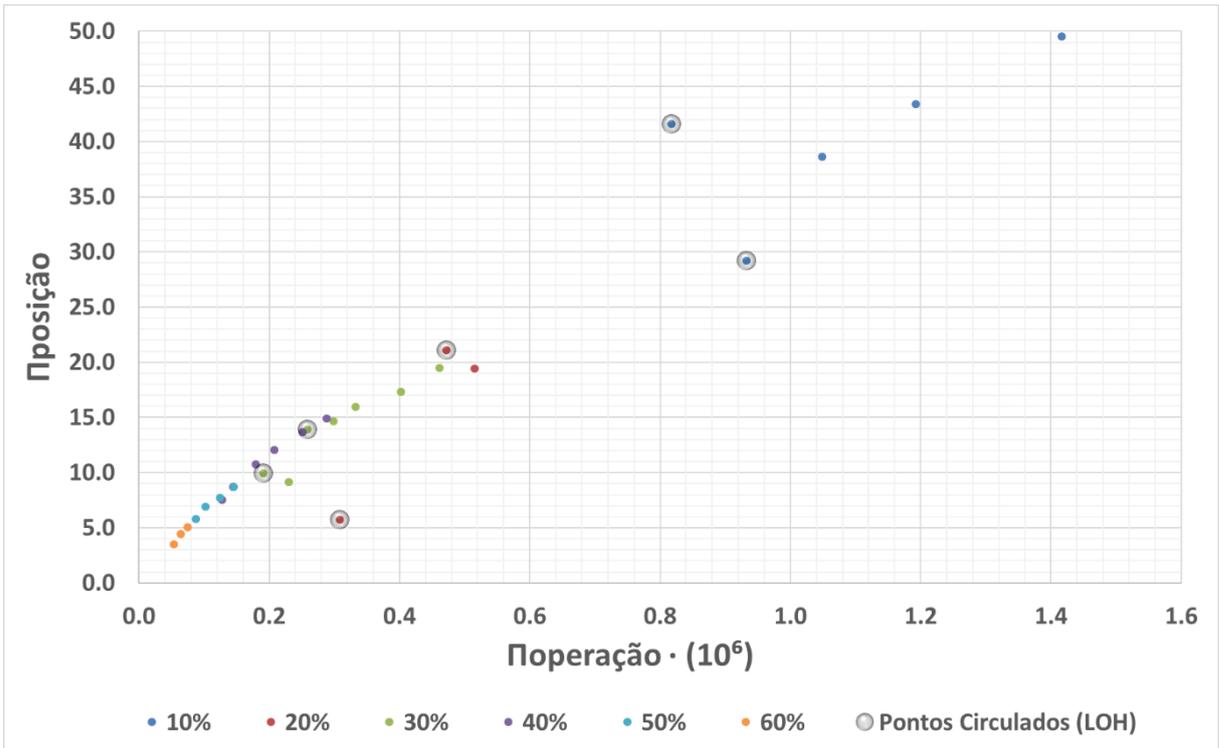
As tabelas mostram os valores encontrados do comprimento limite para a pressão média e para as pressões com probabilidades de não excedência de 1% e 0.1%, evidenciando que quanto maior a vazão maior será o valor do comprimento limite, assim como, quanto menor for a probabilidade de não excedência, maior será o valor do comprimento limite.

Os resultados encontrados são para uma seção quadrada de 4 metros de lado, sendo que estes valores indiciam onde deve ser realizada a blindagem da estrutura, caso haja necessidade de ultrapassar a vazão crítica.

5.8 ADIMENSIONAL PARA DIFERENTES PROBABILIDADES

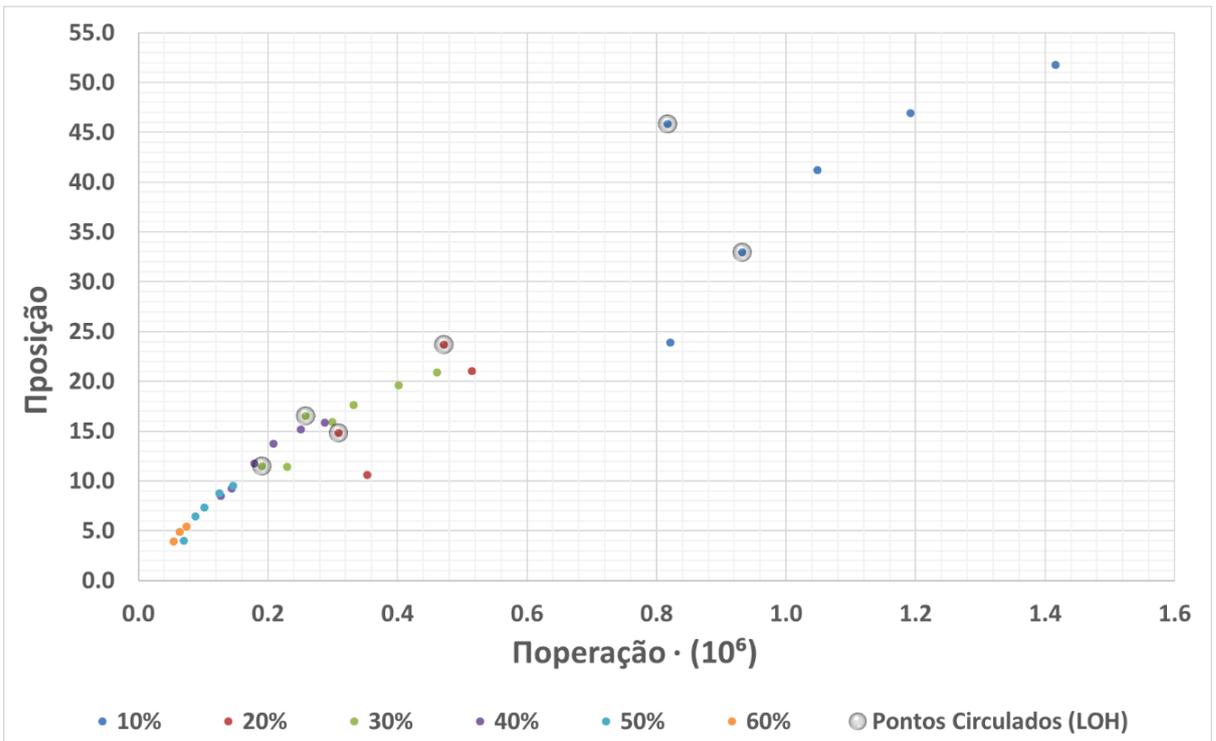
Após transformados e obtidos os gráficos na escala de protótipo para as diferentes probabilidades de ocorrência e para a média, foi aplicado o mesmo adimensional, sabendo que, o valor de x_{limite} deveria ser maior para uma mesma condição de ensaio, já que, para as probabilidades de não excedência de 1% e 0.1% os valores das pressões em um ponto são menores se comparado com os valores médios, ocorrendo cavitação caracterizada, com maior comprimento ao longo do conduto. As figuras 83 e 84 mostram o adimensional aplicado e destacados os pontos obtidos no LOH, e a figura 85 mostra os índices obtidos para a média e as duas probabilidades.

Figura 83 – Adimensional calculado para P1%



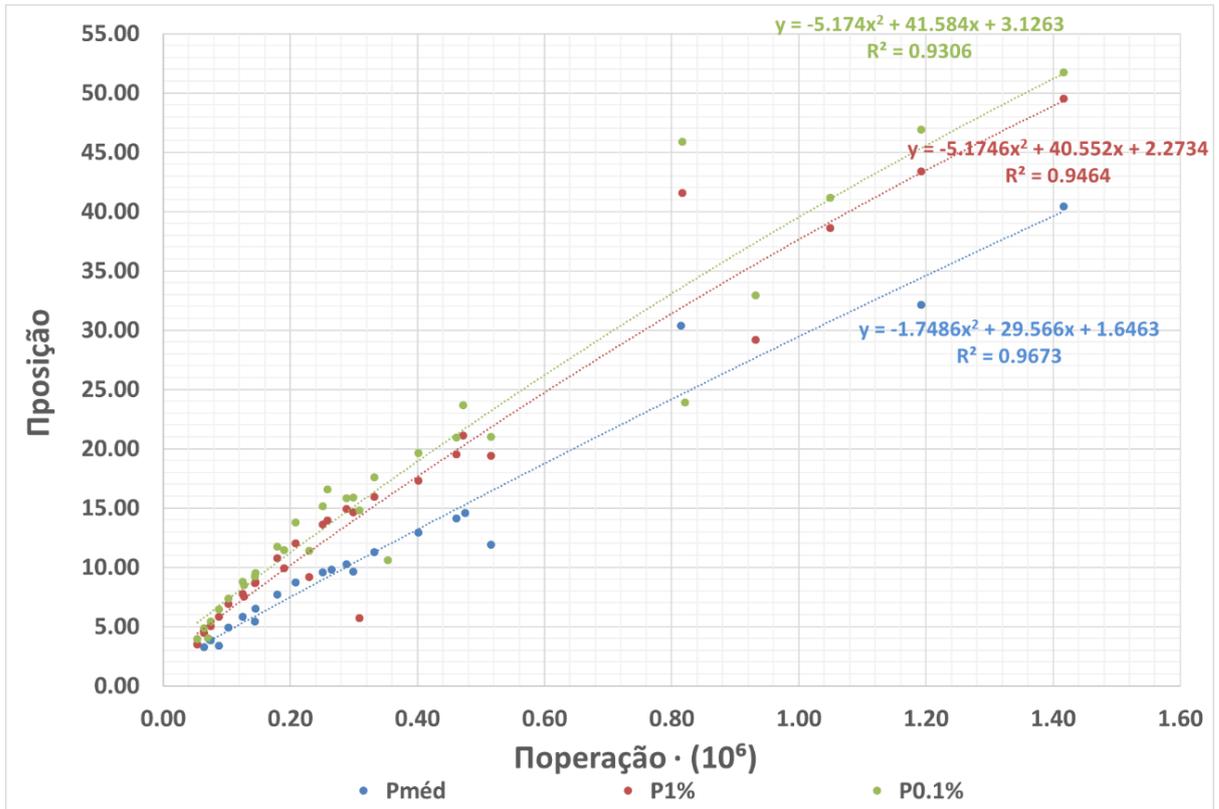
(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 84 – Adimensional calculado para P0.1%



(fonte: elaborada pelo autor)

Figura 85 – Adimensionais para diferentes probabilidades



(fonte: elaborada pelo autor)

Os pontos seguem uma tendência no gráfico, e os pontos fora desta tendência são os pontos em que a cavitação está iniciando para uma dada vazão, em alguns casos, ultrapassando o valor da pressão limite da veia contraída em apenas um ponto ao longo do comprimento na base do conduto, não sendo muito representativos.

Foram geradas três equações de segundo grau para as três curvas Pméd, P1% e P0.1%, assim como assinalados seus respectivos coeficientes de determinação (R²), mostrando uma relação entre as curvas de tendência obtidas e os dados, pois os coeficientes de determinação estão próximos de 1.

6 CONCLUSÃO

Os adimensionais calculados mostraram um comportamento que pode ser aproximado por uma curva de segundo grau, os danos que seriam causados pelas menores probabilidades de não excedência (1% e 0.1%) aumentam a área com possibilidade de danos por cavitação. As curvas obtidas com o adimensional, inicialmente proposto para avaliar esforços de tração no concreto, podem ser um instrumento a mais para futuros projetos que utilizem este tipo de comporta em condutos retangulares.

A transformação dos dados pela semelhança de Froude se mostrou adequada para este caso, mesmo sendo um conduto forçado, pois os efeitos viscosos são desprezíveis. Entretanto em algumas aberturas, 10% e 20%, as pressões médias e as pressões extremas oscilaram bastante de um modelo para o outro, e esse fenômeno se deve a hipótese de que as forças de downlift associadas a pequenas mudanças da geometria do lábio da comporta causam este efeito.

Os valores obtidos para a perda de carga singular ficaram próximos aos valores encontrados na bibliografia de USACE (2018), pois nos dois modelos reduzidos, os pontos calculados ficaram bastante próximos aos pontos dos autores, e também, à curva dos modelos reduzidos para comporta segmento invertida instalada em condutos retangulares, previamente estudados. Os valores obtidos no modelo reduzido UFPEL se aproximaram mais da curva proposta pelos autores, os valores obtidos para a perda de carga no LOH se mostraram um pouco instáveis, pois em algumas aberturas a perda é maior e em outras é menor.

A obtenção das vazões críticas é o primeiro passo para prever até qual vazão haverá, ou não, problemas por cavitação a jusante das comportas segmento invertida, sendo importante para projetistas considerar outras opções, como inserção de ar ou blindagem da área, se não for possível outra solução.

O valor do comprimento limite indica até que ponto ao longo da base do conduto são esperados danos para uma dada vazão e abertura da comporta, sendo valores de grande importância, principalmente os valores obtidos para as pressões médias ($P_{méd}$), pois estes indicam onde ocorrerá o dano a jusante da comporta e com uma incidência maior.

REFERÊNCIAS

- ABNT *NBR 7259:2001- Comportas hidráulicas*, 2001.
- ABREU, A.S. *Processo de cavitação em estruturas hidráulicas: escoamento a jusante de comportas tipo segmento invertido*. Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2014.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. *Diretrizes para estudos de arranjos de obras de transposição de desnível para a navegação*. Manual do Usuário, 2012.
- ARAUZ, I.J. *Vertedor de superfície e escoamento sob comportas*. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- BAINES, W.D. *Flow through Tainter Valves*. National Research Laboratories. Canada, Ottawa, 1954.
- BATTISTON C.C. *Análise da Dinâmica do Escoamento a Jusante De Comporta de Controle de Vazão em Aqueduto de Eclusa de Navegação*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2013.
- BORJA J. G. *Considerações Sobre Dissipação de Energia a Jusante de Vertedouros Salto Esqui*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2012.
- BRIGHETTI G. e DOURADO C.L. *Aplicações e Usos da Medição de Pressões em Modelos de Eclusas de Navegação*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.
- CARLTON, J. *Marine propellers and propulsion*. 2nd. ed. Burlington: Elsevier Ltd, 2007.
- CUOMO, A.R., PETRY, B., USSAMI, H. *Análise matemática de fenômenos transientes em eclusas de navegação – Tucuruí, um exemplo brasileiro*. Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação. São Paulo, 1982.
- DAI PRÁ. M. *Uma abordagem para determinação das pressões junto ao fundo de dissipadores de energia por ressalto hidráulico*. Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre–RS, 2011.
- DALLA CORTE, M. *Simulação numérica tridimensional do escoamento em uma comporta segmento invertida por CFD*. Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo-RS, 2013.
- DUTRA, T.O. *Critérios de projeto hidráulico de eclusas de navegação: pressões médias nos condutos de enchimento e esvaziamento*. Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2014.
- ERBISTE, P.C.F. *Comportas Hidráulicas*. Editora Campus/Eletróbrás, Rio de Janeiro-RJ, 1987.

- FALVEY H. T. *Cavitation in Chutes and Spillways*. Engineering Monograph No. 42 Bureau of Reclamation, Denver, 1990.
- HAMMACK, A. *Hydraulic Analysis of the Pickwick Lock Culvert Valves*. The U.S. Army Engineer Research and Development Center (ERDC). Coastal and Hydraulics Laboratory Vicksburg, 2019.
- INTERNATIONAL COMMISSION ON LARGE DAMS. *Brazilian Committee on Dams(Org.). Large Brazilian spillways: overview of Brazilian practice and experience in designing and building spillways for large dams*. Rio de Janeiro, 2002.
- KEMPKA, M. *Determinação das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida: Aplicação em Eclusas de Navegação*. Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2011.
- KEMPKA, M. *Estimativa da Distribuição Longitudinal das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2014.
- KORMANN, A.C. et al. *Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – Mecanismo e recuperação*. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza – CE, 2001.
- LIN, C.H.; YEN, J.F.; TSAI, C.T. *Influence of Sluice Gate Contraction Coefficient on Distinguishing Condition*. J. Irrig. Drain Eng, 2002.
- MACINTYRE, A. J. *Bombas e instalações de Bombeamento*. Rio de Janeiro: 2. ed. revista LTC, 2016.
- MARQUES, M.G., DRAPEAU, J., VERETTE J. L. *Flutuação de Pressão em um Ressalto Hidráulico*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 2, 1997.
- MATOS, J., MEIRELES, I. *Hydraulics of stepped weirs and dam spillways: engineering challenges, labyrinths of research*. International Symposium on Hydraulic Structures. Brisbane – Australia, 2014.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, Secretária de Política Nacional de Transportes. *Diretrizes da Política Nacional de Transporte Hidroviário*. Edição Revisada, 2010.
- MUSTAFA, T. *A statistical Model to simulate the Geometry of the Tunnel Gates Lips*. Technical Engineering College-Baghdad, Middle Technical University, Baghdad, Iraq, 2019.
- NETTO, A. *Manual de Hidráulica*. São Paulo: 9. ed. Edgard Blücher, 2015.
- OLIVEIRA, F.F.M. *Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida em Condutos de Eclusas*. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 2016.
- PALAURO, C. *Análise das pressões mínimas a jusante de comporta tipo segmento invertida em eclusas de navegação*. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2012.

- PRIEBE, P.S. *Caracterização das Pressões Induzidas pelo Escoamento a Jusante de Comportas em Conduitos Retangulares*. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS, 2016.
- QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M. *Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ministério de Habilitação e Obras Públicas, Lisboa, 1980.
- SANTOS, S. R. *Projeto Hidráulico de Eclusas de Alta Queda*. – Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- SAYAH S. M., BONANNI S. *Design and erection of the 6 bottom outlets of Cerro del Águila dam for flood routing during construction and future sediment flushing*. Bordeaux, 2015.
- SELL, B.M., PRIEBE, P.S., Dai Prá, M. *Estabelecimento de Parâmetros de Projeto Hidráulico de Conduitos Retangulares de Concreto*. Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas-RS, 2018.
- TRINDADE, J. *Hidrodinâmica e Propulsão: Engenharia de Máquinas Marítimas*. Rio de Janeiro: ENIDH, 2012.
- USACE. UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS. *Hydraulic Design of Navigation Locks*. EM EM *1110-2-1610. Disponível em: https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Users/182/86/2486/EM_1110-2-1610.pdf 2018.
- WHITE, F.M. *Mecânica dos Fluidos*. 4 ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, c2002.