

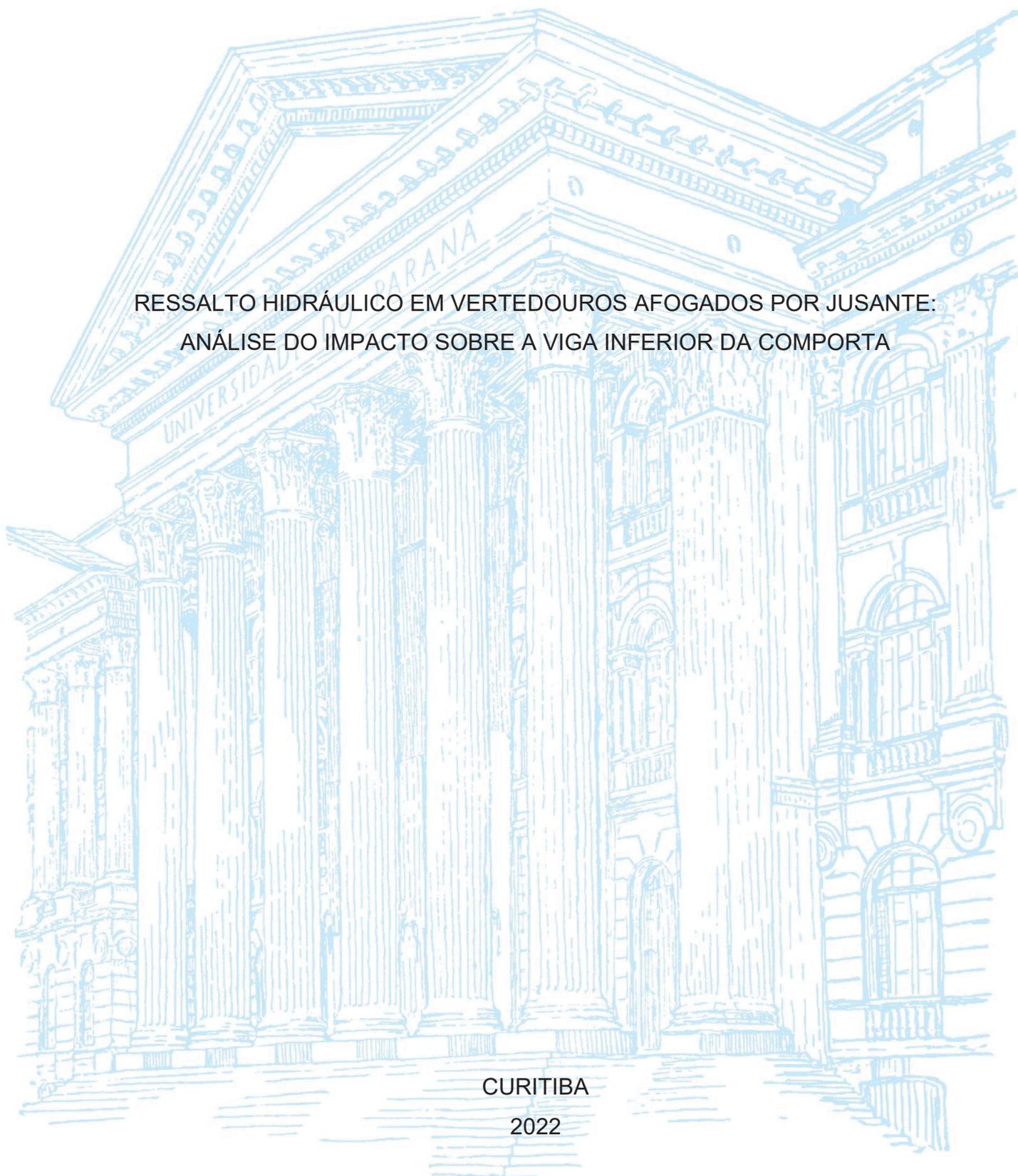
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RAQUEL SAYURI OMOTO TAKEDA

RESSALTO HIDRÁULICO EM VERTEDOUROS AFOGADOS POR JUSANTE:  
ANÁLISE DO IMPACTO SOBRE A VIGA INFERIOR DA COMPORTA

CURITIBA

2022



RAQUEL SAYURI OMOTO TAKEDA

RESSALTO HIDRÁULICO EM VERTEDOUROS AFOGADOS POR JUSANTE:  
ANÁLISE DO IMPACTO SOBRE A VIGA INFERIOR DA COMPORTA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental (PPGERHA), Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

CURITIBA

2022

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Takeda, Raquel Sayuri Omoto

Ressalto hidráulico em vertedouros afogados por jusante:  
análise do impacto sobre a viga inferior da comporta. / Raquel  
Sayuri Omoto Takeda. – Curitiba, 2022..  
1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná,  
Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em  
Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. José Junji Ota

1. Vertedouros. 2. Comportas. 3. Estruturas hidráulicas. I. Ota,  
José Junji. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e  
Ambiental. III. Título.

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE  
RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL - 40001016021P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **RAQUEL SAYURI OMOTO TAKEDA** intitulada: **RESSALTO HIDRÁULICO EM VERTEDOUROS AFOGADOS POR JUSANTE: ANÁLISE DO IMPACTO SOBRE A VIGA INFERIOR DA COMPORTA**, sob orientação do Prof. Dr. JOSÉ JUNJI OTA, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 19 de Maio de 2022.

Assinatura Eletrônica  
05/07/2022 10:51:22.0  
JOSÉ JUNJI OTA  
Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica  
19/05/2022 18:22:06.0  
BRUNO VÍCTOR VEIGA  
Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ - DEP. DE:  
HIDRÁULICA)

Assinatura Eletrônica  
19/05/2022 18:04:01.0  
ANDRE LUIZ TONSO FABIANI  
Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica  
23/05/2022 15:49:38.0  
FÁBIO TEODORO DE SOUZA  
Avaliador Externo (PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO  
PARANÁ)

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente à minha família, que sempre me apoiou e incentivou.

Aos amigos, com quem sempre pude e sei que posso contar.

Aos colegas de trabalho, que são inspiração, e em especial ao gerente Rafael de Lara pelo estímulo, exemplo e apoio.

À Copel pela oportunidade de aprendizado e crescimento.

À equipe do Lactec e Intertechne desenvolvedores do projeto de pesquisa.

Ao professor José Junji Ota pela orientação, compreensão e paciência.

## RESUMO

No Brasil, será cada vez mais comum a construção de usina de baixa queda com vertedouros afogados por jusante. Essa condição pode gerar esforços hidrodinâmicos não previstos, decorrentes do impacto de oscilações do ressalto hidráulico na viga inferior da comporta segmento. Atualmente não existem metodologias para definição desses esforços. Visando contribuir com o desenvolvimento deste tema, que traz segurança no dimensionamento dessas estruturas, o presente trabalho realizou ensaios em modelo físico reduzido em escala 1:25 para medição dos esforços na viga inferior da comporta segmento. Foram verificados esforços máximos da ordem de 3.900 kN, em escala de protótipo, tanto de tração quanto de compressão, correspondentes a cerca de 19% do peso estimado da comporta. Este trabalho faz parte do projeto de P&D PD-06491-0445/2017 de título "Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico" desenvolvido pelo Lactec e Intertechne para Copel Geração e Transmissão S.A., no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor Elétrico regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL".

Palavras-chave: Vertedouros afogados. Ressalto Hidráulico. Comporta Segmento. Modelo Reduzido.

## **ABSTRACT**

In Brazil, it will be increasingly common to build low headed power plants with submerged spillways downstream. This condition can generate hydrodynamic stresses, resulting from the impact of oscillations of the hydraulic jump, on the lower beam of the segment gate. Currently, there are no methodologies to define these stresses. Aiming to contribute to the development of this theme, which brings security to the gate projects, the present work carried out tests in a 1:25 hydraulic scaled model to measure the impact in the lower beam of the radial gate. Maximum stresses of the order of 3.900 kN in prototype scale were verified, both in traction and compression. Stresses of this order represent around 19% of the estimated radial gate weight. The study is part of the P&D project PD-06491-0445/2017 “Empirical Criteria and Computational Methodology for Estimating Forces at Radial Gate Inferior Girder Subject to Hydraulic Jump Waves” (“Critério Empírico e Metodologia Computacional para a Estimativa de Esforços na Viga Inferior de Comportas Segmento Sujeitas a Ondas de Ressalto Hidráulico”), in development by Lactec and Intertechne to Copel Geração e Transmissão S.A., as part of the Electric Power Sector’s Research and Technological Development Program, regulated by the National Agency of Electric Energy (ANEEL).

Keywords: Submerged Spillways. Hydraulic Jump. Radial Gate. Hydraulic Scaled Model.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - COMPORTA SEGMENTO .....	17
FIGURA 2 - SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOIRO DA UHE SANTO ANTÔNIO.....	19
FIGURA 3 - SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOIRO DE BELO MONTE.....	20
FIGURA 4 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO RESSALTO HIDRÁULICO.....	21
FIGURA 5 - CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO SEGUNDO O NÚMERO DE FROUDE .....	23
FIGURA 6 - RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE E SUBMERGIDO .....	24
FIGURA 7 - MODELO REDUZIDO DA COMPORTA DE JIRAU.....	29
FIGURA 8 - TRANSDUTOR ELETRÔNICO DE PRESSÃO DA FABRICANTE ZÜRICH .....	34
FIGURA 9 - VERTEDOIRO - PROJETO PILOTO .....	36
FIGURA 10 - PROJETO TRIDIMENSIONAL DA COMPORTA SEGMENTO .....	37
FIGURA 11 - PROJETO CONSTRUTIVO DO CANAL EXPERIMENTAL: PLANTA, CORTE E ELEVAÇÃO.....	40
FIGURA 12 - CONSTRUÇÃO DO CANAL EXPERIMENTAL .....	41
FIGURA 13 - PEÇAS COMPONENTES DA ESTRUTURA DA SOLEIRA .....	42
FIGURA 14 - SOLEIRA MONTADA .....	42
FIGURA 15 – ARRANJO DA COMPORTA SEGMENTO.....	43
FIGURA 16 - PROJETO DO PILAR – PEÇAS FIXAS E MÓVEIS .....	43
FIGURA 17 - DETALHE DAS PEÇAS FIXAS NA REGIÃO DE CONTATO COM A PEÇA MÓVEL.....	44
FIGURA 18 - PILARES MONTADOS.....	45
FIGURA 19 - COMPORTA DO MODELO .....	46
FIGURA 20 – POSICIONAMENTO DOS PIEZÔMETROS NA SOLEIRA DO VERTEDOIRO - CORTE .....	48
FIGURA 21 - POSICIONAMENTO DOS PIEZÔMETROS NA SOLEIRA DO VERTEDOIRO - PLANTA.....	48
FIGURA 22 - POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES NA SOLEIRA DO VERTEDOIRO - CORTE .....	49
FIGURA 23 - POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES NA SOLEIRA DO VERTEDOIRO - PLANTA.....	50

FIGURA 24 – PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DA VIGA DA COMPORTA .....	51
FIGURA 25 – POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA .....	51
FIGURA 26 – TRANSDUTORES NO MODELO REDUZIDO .....	52
FIGURA 27 – ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS SENSORES S03 E S11 .....	57
FIGURA 28 – PRESSÕES MÉDIAS – ANÁLISE DAS DIFERENTES TAXAS DE AQUISIÇÃO .....	59
FIGURA 29 – INCOERÊNCIAS OBSERVADAS NAS SÉRIES TEMPORAIS DE PRESSÕES MÉDIAS .....	61
FIGURA 30 – ENSAIOS FINAIS – PRESSÃO MÉDIA .....	63
FIGURA 31 – ENSAIOS FINAIS – DESVIO PADRÃO .....	63
FIGURA 32 – ENSAIOS FINAIS – PRESSÃO MÍNIMA .....	63
FIGURA 33 – ENSAIOS FINAIS – PRESSÃO MÁXIMA .....	64
FIGURA 34 – ENSAIOS FINAIS – ESFORÇOS MÉDIOS .....	65
FIGURA 35 – ENSAIOS FINAIS – ESFORÇOS MÍNIMOS E MÁXIMOS POR PAR DE SENSOR .....	65
FIGURA 36 – ENSAIOS FINAIS – ESFORÇOS MÁXIMOS ABSOLUTOS .....	66
FIGURA 37 – ENSAIOS INICIAIS – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO JUNTO À VIGA HORIZONTAL INFERIOR DA COMPORTA .....	71
FIGURA 38 – ENSAIOS FINAIS – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO JUNTO À VIGA HORIZONTAL INFERIOR DA COMPORTA .....	72
FIGURA 39 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 1.1 .....	75
FIGURA 40 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 1.2 .....	75
FIGURA 41 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 2.1 .....	75
FIGURA 42 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 2.2 .....	76
FIGURA 43 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 3.1 .....	76
FIGURA 44 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 3.2 .....	76
FIGURA 45 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 4.1 .....	77
FIGURA 46 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 4.2 .....	77
FIGURA 47 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 3.3 .....	79
FIGURA 48 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 3.6 .....	79
FIGURA 49 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 4.2 .....	79
FIGURA 50 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 4.5 .....	80
FIGURA 51 – LINHAS PIEZOMETRICAS – ENSAIOS INICIAIS .....	85

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DE COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO .....	24
TABELA 2 - RELAÇÃO DE ESCALA EM FUNÇÃO DA ESCALA GEOMÉTRICA ( $\lambda$ ) .....	31
TABELA 3 - ESCALA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS CONSIDERANDO O CRITÉRIO DE SEMELHANÇA DE FROUDE .....	38
TABELA 4 – ENSAIOS PRELIMINARES – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS .....	54
TABELA 5 -CONDIÇÕES HIDRÁULICAS - ENSAIOS PRELIMINARES – MODELO FÍSICO .....	55
TABELA 6 – RELAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO DA FACE SUPERIOR E INFERIOR.....	57
TABELA 7 – CONDIÇÕES HIDRÁULICAS - ENSAIOS INICIAIS .....	58
TABELA 8 – ENSAIOS FINAIS .....	62
TABELA 9 – NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 1.1 e 1.2.....	73
TABELA 10 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 2.1 e 2.2.....	73
TABELA 11 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 3.1 e 3.2.....	74
TABELA 12 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 4.1 e 4.2.....	74
TABELA 13 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS FINAIS 3.3 E 3.6.....	78
TABELA 14 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS FINAIS 4.2 E 4.5.....	78
TABELA 15 – PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOIRO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 1.1 E 1.2.....	81
TABELA 16 - PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOIRO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 2.1 E 2.2 .....	82
TABELA 17 - PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOIRO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 3.1 E 3.2 .....	83
TABELA 18 - PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOIRO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 4.1 E 4.2 .....	84
TABELA 19 – PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA MEDIDOS COM TRANSMISSORES DE PRESSÃO – ESTUDOS INICIAIS.....	85
TABELA 20 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 1.1 .....	86
TABELA 21 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 1.2 .....	87
TABELA 22 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 2.1 .....	88

TABELA 23 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 2.2 .....	89
TABELA 24 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 3.1 .....	90
TABELA 25 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 3.2 .....	91
TABELA 26 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 4.1 .....	92
TABELA 27 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 4.2 .....	93
TABELA 28 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 3.2 .....	94
TABELA 29 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 3.6 .....	95
TABELA 30 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 4.2 .....	96
TABELA 31 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 4.5 .....	97
TABELA 32 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 3.3.....	98
TABELA 33 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 3.6.....	99
TABELA 34 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 4.2.....	100
TABELA 35 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 4.5.....	101

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1 JUSTIFICATIVA .....	14
1.2 OBJETIVOS .....	15
1.2.1 Objetivo geral .....	15
1.2.2 Objetivos específicos.....	15
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 COMPORTAS SEGMENTO .....	16
2.1.1 Comportas segmento afogadas – empreendimentos.....	18
2.1.1.1 UHE Santo Antônio.....	18
2.1.1.2 UHE Jirau .....	19
2.1.1.3 UHE Belo Monte .....	19
2.2 RESSALTO HIDRÁULICO .....	20
2.2.1 Profundidades Conjugadas .....	21
2.2.2 Classificação do ressalto hidráulico .....	22
2.2.3 Comprimento do ressalto hidráulico .....	23
2.2.4 Grau de submergência do ressalto hidráulico .....	24
2.3 COMPORTAS AFOGADAS POR JUSANTE – ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS ATUANTES .....	25
2.4 MODELAGEM FÍSICA.....	29
2.4.1 Critérios de Semelhança .....	30
2.4.2 Definição da escala .....	31
2.5 MEDIÇÕES DE ESFORÇOS .....	33
2.5.1 Sensores eletrônicos de pressão .....	33
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO PILOTO .....	35
3.2 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO .....	37
3.2.1 Canal experimental .....	38
3.2.2 Soleira .....	41
3.2.3 Pilares .....	43
3.2.4 Comporta.....	45
3.2.5 Instrumentação.....	47
3.2.5.1 Medição de Vazão .....	47

3.2.5.2 Medição de níveis de água .....	47
3.2.5.3 Medição de pressão na soleira do vertedouro .....	47
3.2.6 Medição de esforços na viga inferior da comporta segmento .....	50
3.3 ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO .....	52
3.3.1 Ensaio.....	53
3.3.2 Análise dos dados .....	56
3.3.3 Transformação em esforços .....	56
<b>4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>58</b>
4.1 ENSAIOS INICIAIS .....	58
4.2 ENSAIOS FINAIS.....	61
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>67</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE 1 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO.....</b>	<b>71</b>
<b>APÊNDICE 2 – NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE .....</b>	<b>73</b>
<b>APÊNDICE 3 – PRESSÕES MÉDIAS NA SOLEIRA DO VERTEDOURO.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE 4 – PRESSÕES NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA .....</b>	<b>86</b>
<b>A.1 ENSAIOS INICIAIS .....</b>	<b>86</b>
<b>A.2 ENSAIOS FINAIS .....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE 5 – ESFORÇOS NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA.....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo dados do Plano Nacional de Energia 2050 (MME, 2020), elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética - EPE a partir das diretrizes do Ministério de Minas e Energia - MME, os maiores potenciais hidrelétricos a serem aproveitados no Brasil encontram-se nas regiões Norte e Centro-Oeste, totalizando 40% do potencial hidrelétrico inventariado. De maneira geral, para evitar grandes áreas alagadas, estes aproveitamentos têm como característica típica as médias e baixas quedas. Associadas às elevadas vazões de cheia durante o período úmido, as comportas desses vertedouros costumam ser altas, para diminuir a largura do vertedouro, podendo muitas vezes apresentar submergência pelos níveis de água de jusante. Essa configuração faz com que, frequentemente, o ressalto hidráulico seja forçado contra as comportas segmento, gerando esforços hidrodinâmicos não previstos no dimensionamento estrutural dessa peça. Esse tipo de vertedouro não era comum na maioria das grandes obras já construídas, pois, em usinas de maiores quedas, a ogiva do vertedouro se encontra bem acima do nível de jusante, gerando um escoamento supercrítico sobre a calha, e a comporta fica submetida predominantemente a cargas hidrostáticas sobre seu paramento de montante.

A tentativa de evitar o afogamento por jusante elevando-se crista do vertedouro exige uma estrutura de maior comprimento e com maior número de comportas para o descarregamento das cheias, uma vez que os vãos das comportas ficam mais baixos, de maneira antieconômica.

A solução paliativa que tem sido utilizada em casos de afogamento por jusante em projetos recentes é a definição de regras de manobra de comportas onde as vigas inferiores se mantêm 100% do tempo afogadas ou 100% do tempo fora da água. Essa operação assimétrica, entretanto, pode ocasionar outros problemas, tais como efeitos decorrentes de correntes de retorno na bacia de dissipação ou a possibilidade de geração de vórtices intensos a montante, junto ao paramento da comporta.

Atualmente existem diversos trabalhos direcionados à análise da turbulência e das ondas geradas por ressalto hidráulico, porém, costumam focar na erosão a jusante da bacia e na estabilidade da bacia de dissipação, dos muros laterais do vertedouro e de outras estruturas civis. Já estudos sobre vertedouros de baixa queda com afogamento por jusante geralmente tem seu foco na capacidade de descarga do vertedouro e das pressões ao longo da ogiva. Até hoje não foram definidos critérios

ou metodologias que permitam estimar os esforços atuantes nas comportas gerados por ondas de ressalto hidráulico.

Para aproveitamentos de baixa queda recentemente implantados no país, tem-se registro de alguns ensaios em modelo reduzido, onde a conclusão principal é a recomendação de evitar certas faixas operacionais, com relativamente pouca contribuição ao conhecimento dos fenômenos envolvidos. Entretanto, as conclusões desses estudos comprovam a relevância do tema, uma vez que, os esforços medidos aparentam ser significativos. Para a UHE Santo Antônio, no rio Madeira, verificou-se que os esforços poderiam chegar a 1/3 do peso da comporta, enquanto para a UHE Jirau, também no rio Madeira, observou-se que os esforços hidrodinâmicos resultaram em valores equivalentes a 21% do peso da comporta, demonstrando a relevância do tema.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Sabe-se que grande parte do potencial hidrelétrico ainda não desenvolvido no Brasil está localizado nas regiões Norte e Centro-Oeste do Brasil, e que a característica desses aproveitamentos é a média e baixa queda. Neste tipo de configuração, é comum que haja submergência da comporta pelos níveis de jusante, como por exemplo, a UHE Jatobá, no rio Tapajós, e a UHE Jardim de Ouro no rio Jamanxim. Nos Estudos de Inventário, a UHE Jatobá (eixo TPJ445) apresenta um desnível de 16 metros e prevê um vertedouro controlado com crista na elevação 46,0 m, 4 metros abaixo do nível de água normal do reservatório do aproveitamento de jusante. Já a UHE Jardim de Ouro (JMX257), aproveita uma queda de 14 metros e tem a crista de seu vertedouro prevista em 1,5 metros abaixo do nível do reservatório do aproveitamento de jusante.

Embora a característica de baixa queda seja associada aos aproveitamentos da região Norte e Centro Oeste do país, outros empreendimentos identificados nos inventários de outras regiões também apresentaram eixos com essas características, tais como a UHE Ercilândia, no rio Piquiri, e a UHE Iraí, no rio Uruguai.

Empreendimentos de baixa e média queda geralmente são dotados de vertedouros com bacias de dissipação com ressalto hidráulico e, em casos de submergência pelos níveis de jusante, esse ressalto tende a ser empurrado contra a comporta. Atualmente não existe um critério para definição dos esforços

hidrodinâmicos decorrentes desses impactos e, conseqüentemente, não são considerados no dimensionamento da estrutura.

Considerando que as comportas de um vertedouro estão diretamente ligadas à segurança do empreendimento como um todo, podendo-se colocar em risco a operação do empreendimento e as comunidades situadas a jusante, entende-se importante a realização desse estudo a fim de se verificar a influência dos esforços hidrodinâmicos atuantes sobre a comporta, de modo a permitir o desenvolvimento de projetos de comportas seguros e empreendimentos econômicos.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Analisar os esforços resultantes da medição em modelo físico reduzido instrumentados com transdutores de pressão, gerados pelo impacto do ressalto hidráulico na viga inferior de uma comporta segmento em um vertedouro de baixa queda.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Avaliar as características necessárias do modelo físico reduzido para que seja possível a medição dos esforços atuantes na viga inferior da comporta;
- Avaliar o sistema de instrumentação adotado para a medição dos esforços atuantes na viga inferior da comporta.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 COMPORTAS SEGMENTO

Existem diversos tipos de comporta: gaveta, ensecadeira, vagão, lagarta, *Stoney*, segmento, setor, tambor, basculante, rolante, cilíndrica, mitra, telhado, visor, mista e múltipla. Esses tipos estão definidos na norma brasileira NBR 7529/2001 (ABNT, 2001). Na norma, essas comportas são classificadas segundo a sua movimentação em funcionamento, mas podem ainda ser classificadas quanto à função, descarga, composição do tabuleiro, localização e forma do paramento.

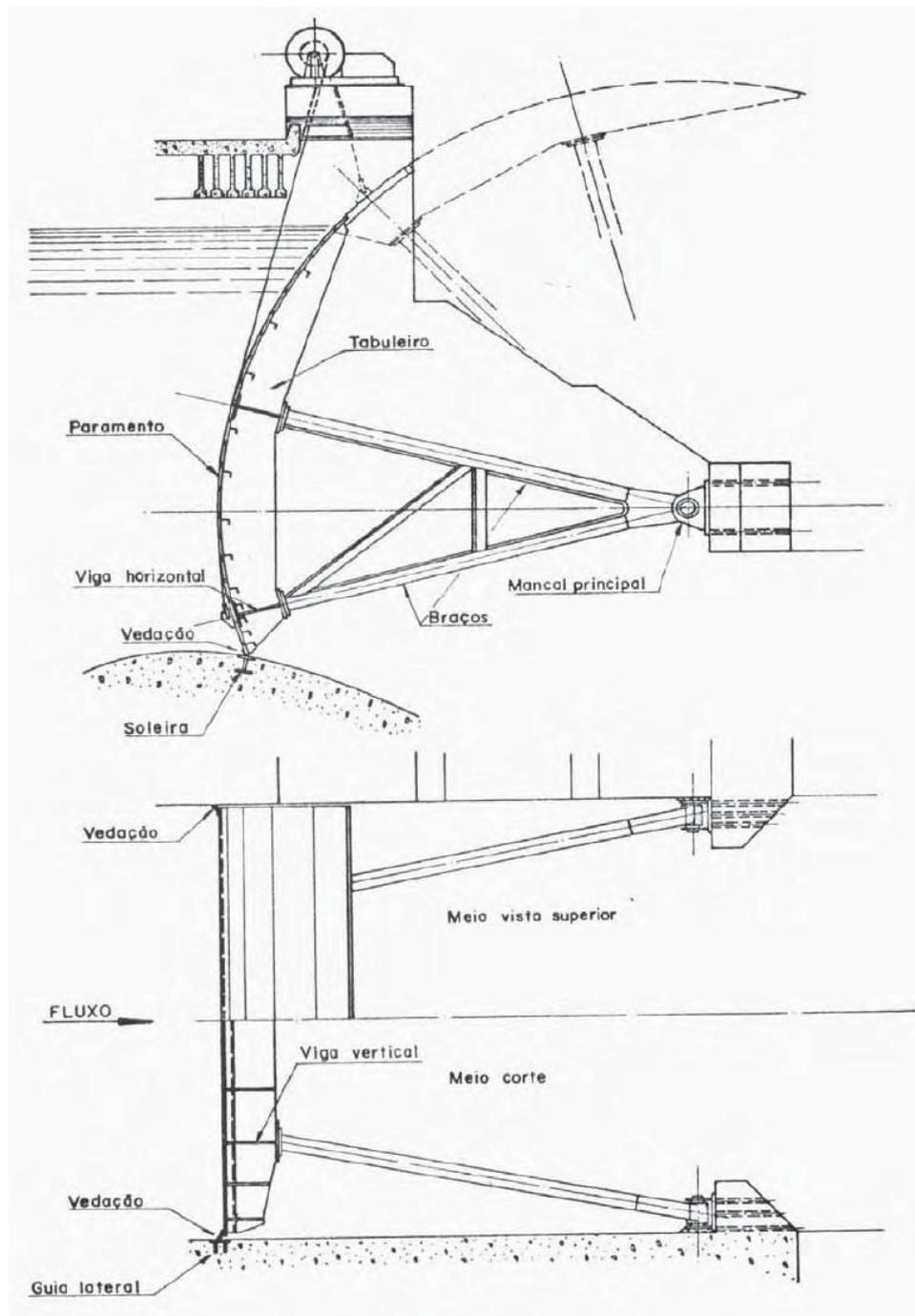
Erbisti (2002) lista os tipos de comportas aplicáveis em vertedouro: segmento, basculante, vagão, setor, tambor, segmento com basculante e vagão dupla tipo gancho. Dentre essas, o autor afirma que as mais econômicas e mais adequadas para passagem de grandes vazões são as comportas segmento.

Conforme definição da NBR 7529/2001 (ABNT, 2001), as comportas segmento são comportas de rotação com paramento curvo correspondente a um segmento de cilindro com diretriz circular, apresentando braços radiais que transmitem a pressão hidráulica para mancais fixos. O eixo de apoio dos braços da comporta são montados em vigas ancoradas nas paredes laterais, denominadas vigas munhão. O perfil do tabuleiro é um segmento circular. A FIGURA 1 apresenta a ilustração de uma comporta segmento e seus principais componentes.

Esses tipos de comportas são particularmente bem adaptadas para o controle em vertedouros devido à simplicidade do projeto, construção e instalação. A economia e eficiência deste tipo de comporta resulta primariamente do mancal radial, sobre o qual é direcionado todo o empuxo hidrostático, oferecendo pouca resistência para a operação da comporta, sendo que a capacidade de içamento necessária é bem inferior ao que seria requerido de uma comporta plana de deslizamento. Adicionalmente, a comporta segmento é mais adaptável para controle automático. O fechamento é feito por gravidade.

Ainda, para o deslizamento das vedações laterais das comportas, geralmente são instaladas superfícies metálicas alinhadas com as passagens hidráulicas, o que dispensa a necessidade de ranhuras, simplifica o projeto e melhora as condições hidráulicas na região, eliminando uma perturbação potencial ao escoamento, que em muitos casos pode ser origem de cavitação e erosão das superfícies hidráulicas.

FIGURA 1 - COMPORTA SEGMENTO



FONTE: Adaptado de ABNT NBR 7259

Erbisti (2002) afirma que, a fim de minimizar os custos, os vãos das comportas são definidos de maneira a diminuir o comprimento do vertedouro, sendo preferível utilizar comportas de maior altura. Essa consideração é bastante objetiva e, em vertedouros em que a ogiva se encontra bem acima do nível de jusante, existirá um

escoamento supercrítico sobre a ogiva e a comporta ficará sujeita predominantemente a cargas hidrostáticas sobre o paramento de montante. Entretanto, nos casos de vertedouros de baixa queda, essa otimização leva a projetos nos quais a ogiva se encontra afogada. Essa condição pode levar à ocorrência de esforços hidrodinâmicos ainda não devidamente estudados por jusante, resultante do impacto das ondas do ressalto hidráulico e outras perturbações que possam existir, o que pode impactar negativamente no desempenho da comporta, e até em sua segurança. Considerando as previsões de expansão da geração hidroenergética do país, este trabalho visa contribuir com o conhecimento dos impactos desse afogamento sobre as comportas segmento.

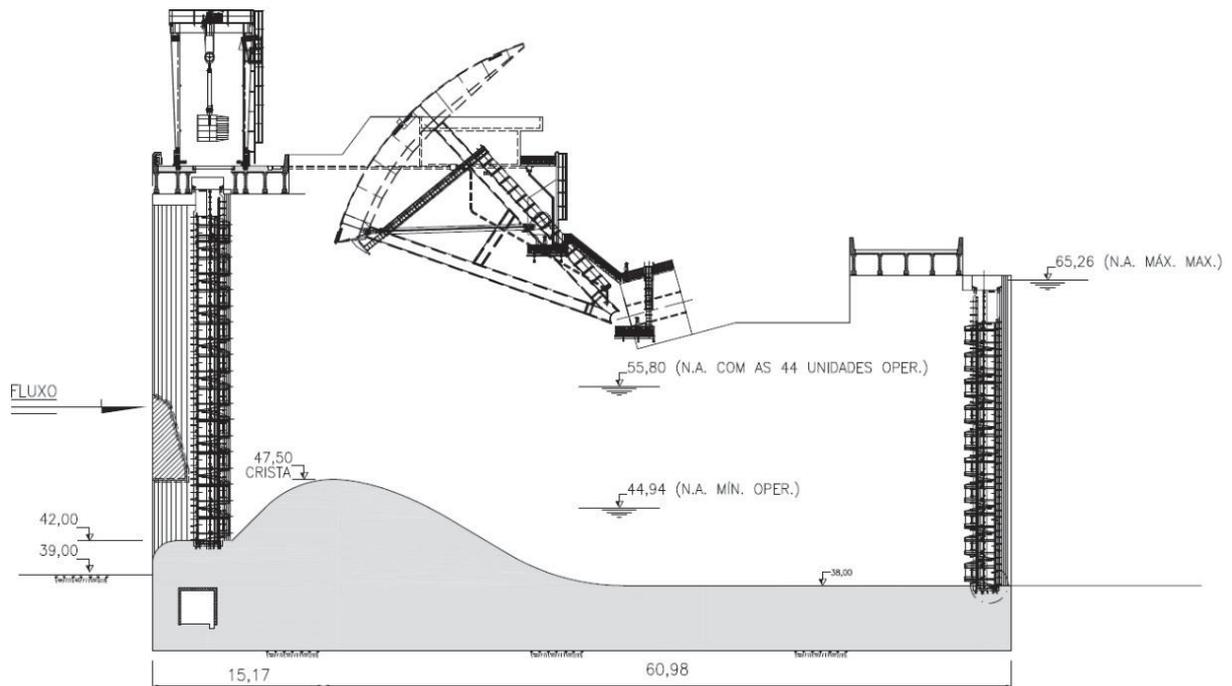
### 2.1.1 Comportas segmento afogadas – empreendimentos

Além dos empreendimentos futuros previstos já mencionados anteriormente - UHE Tapajós, Jardim de Ouro e Jatobá nas regiões Norte e Centro-Oeste, e UHE Ercilândia e Iraí na região Sul, alguns dos empreendimentos recentemente implantados no Brasil já apresentam seus vertedouros afogados pelos níveis de jusante. São os casos das UHEs Santo Antônio, Jirau e Belo Monte.

#### 2.1.1.1 UHE Santo Antônio

A UHE Santo Antônio está localizada no rio Madeira, próximo à cidade de Porto Velho – Rondônia. Para a passagem da vazão de projeto, 84.000 m<sup>3</sup>/s, foram dimensionadas 18 comportas de 20,0 m de largura por 24,2 m de altura. A crista da ogiva encontra-se na elevação 47,50 m, enquanto o nível normal de jusante para as 44 unidades em operação é de 55,80 m. O ponto de apoio da comporta segmento situa-se na elevação 46,82 m, ou seja, sujeita a cerca de 9,0 m de afogamento. A FIGURA 2 ilustra o perfil desse vertedouro.

FIGURA 2 - SEÇÃO LONGITUDINAL DO VERTEDOURO DA UHE SANTO ANTÔNIO



FONTE: Povh, Araujo Filho e Vanz (2013)

### 2.1.1.2 UHE Jirau

A UHE Jirau localiza-se no rio Madeira, a 120 km a montante da capital Porto Velho – Rondônia, e da UHE Santo Antônio. A cheia de projeto de cerca de 82.600 m<sup>3</sup>/s foi prevista para ser descarregada por 18 comportas segmento de 20,0 m de altura por 21,6 m de largura. O ponto de assentamento da comporta é na El.68,43 m e o nível máximo normal de jusante na El. 74,23 m, resultando em um afogamento de cerca de 5,8 m no início do vertimento.

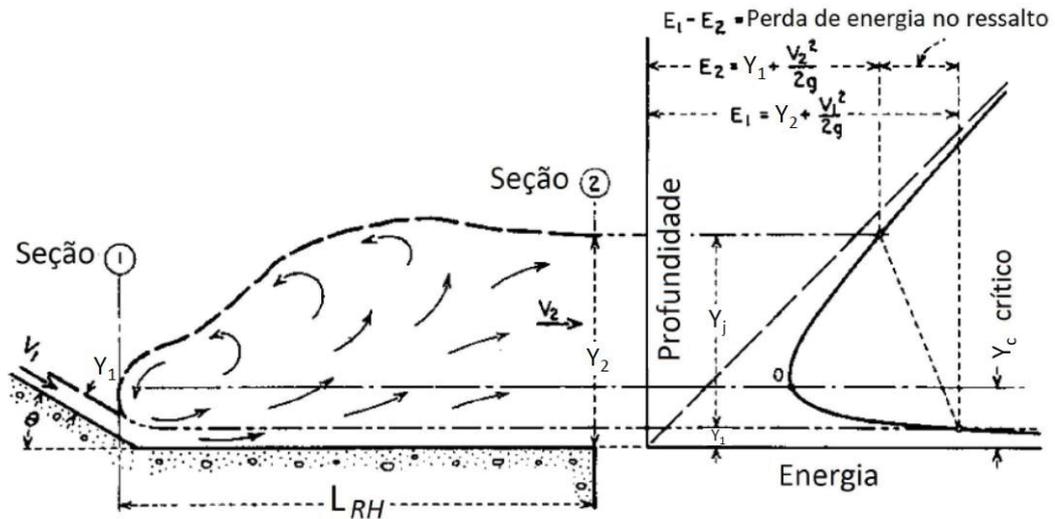
### 2.1.1.3 UHE Belo Monte

A UHE Belo Monte está situada no rio Xingu, estado do Pará, e é o maior empreendimento hidrelétrico totalmente nacional. A vazão decamilar atinge 61.840 m<sup>3</sup>/s e o vertedouro desse reservatório principal, projetado para tal descarga, é composto por 18 comportas segmento de 20,0 m de altura por 22,0 m de largura. Diferentemente dos aproveitamentos UHE Santo Antônio e UHE Jirau, este aproveitamento é de derivação, e parte da vazão é desviada para geração de energia na casa de força principal. Dessa forma, o nível de jusante cria condições menos severas de afogamento das comportas. Junto ao vertedouro foi prevista uma casa de



crítica e velocidade subcrítica - seção 2. Nessa transição entre regimes de escoamento é que se forma o ressalto hidráulico, onde parte da energia cinética ( $V^2/2g$ ) se transforma em energia potencial ( $Y$ ). Outra pequena parcela dessa energia é perdida em forma de calor ou ruído ( $\Delta E = E_1 - E_2$ ).

FIGURA 4 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO RESSALTO HIDRÁULICO



FONTE: Adaptado de Peterka (1963)

Onde:

$V_1$  = velocidade média a montante do ressalto hidráulico (m/s);

$Y_1$  = profundidade do escoamento a montante do ressalto hidráulico (m);

$V_2$  = velocidade média a jusante do ressalto hidráulico (m/s);

$Y_2$  = profundidade do escoamento a jusante do ressalto hidráulico (m);

$L_{RH}$  = comprimento do ressalto hidráulico (m);

$Y_j$  = profundidade do ressalto hidráulico (m);

$Y_{c \text{ crítico}}$  = profundidade crítica do escoamento (m).

### 2.2.1 Profundidades Conjugadas

A partir da assunção de hipóteses de pressão hidrostática; distribuição de velocidades uniformes; seção de canal retangular com lados paralelos e fundo horizontal plano; escoamento permanente e efeitos viscosos desprezíveis, Bélanger (1828), propôs, a partir do princípio de conservação da quantidade de

movimento linear, uma relação entre as profundidades a montante e a jusante do ressalto hidráulico, denominadas alturas conjugadas, conforme Equação 2.1.

$$\frac{Y_1}{Y_2} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_{r1}^2} - 1) \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

$Y_1$  = profundidade do escoamento a montante do ressalto hidráulico (m);

$Y_2$  = profundidade do escoamento a jusante do ressalto hidráulico (m);

$F_{r1}$  = Número de Froude a montante do ressalto hidráulico (adimensional).

Existe uma série de trabalhos que estabelecem relações para o cálculo das alturas conjugadas com variados graus de complexidade. Entretanto, conforme observado por Alves (2008), não apresentam grandes diferenças com relação ao proposto por Bélanger, sendo essa a equação mais amplamente utilizada na análise do ressalto.

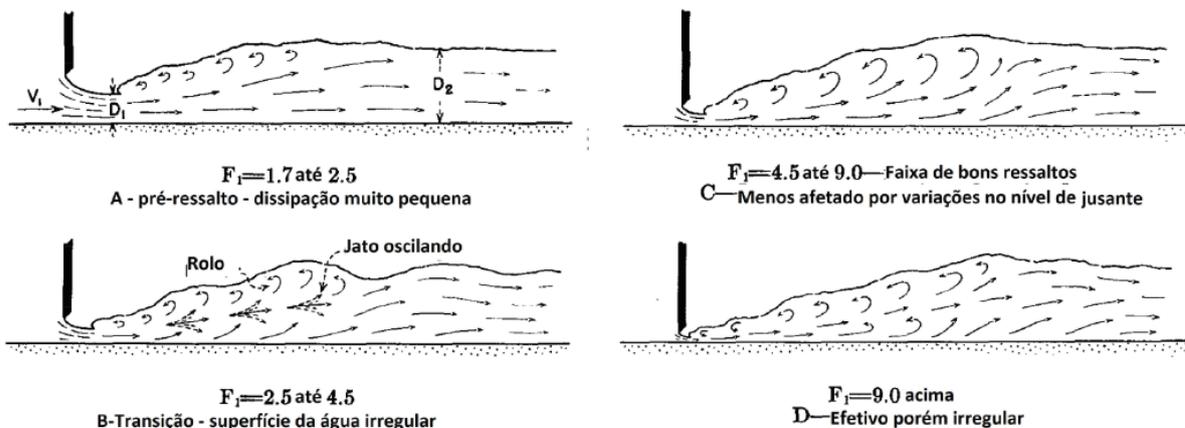
### 2.2.2 Classificação do ressalto hidráulico

A equação de Bélanger serviu como ponto de partida para o estudo de Peterka (1963), que estudou a aplicabilidade da relação através de 125 ensaios em seis diferentes canais. Desses ensaios resultou a forma de classificação do ressalto hidráulico a partir do número de Froude do escoamento de montante. Essa classificação somente se inicia a partir de um número de Froude maior 1,7 quando pequenos rolos aparecem sobre a superfície tornando-se mais intensos conforme esse número aumenta. Para  $Fr$  menor que 1,0 (escoamento subcrítico) ou igual a 1,0 (escoamento crítico) não há formação de ressalto, e para números de Froude entre 1,0 e 1,7, a diferença entre as profundidades conjugadas é pequena e a transição é gradual, formando apenas uma perturbação ao escoamento.

A seguir apresenta-se a classificação do ressalto hidráulico conforme o número de Froude e a FIGURA 5 essas diferenças.

- a)  $1,7 < F_{r1} < 2,5$ : Pré-ressalto – A dissipação de energia é baixa, menor que 20% (Peterka, 1963), e pequenos rolos são formados na superfície;
- b)  $2,4 < F_{r1} < 4,5$ : Ressalto Oscilante – Não há desenvolvimento completo do ressalto, tem um contorno nítido, mas é instável e gera pulsações não-periódicas, que se propagam a jusante por uma longa distância;
- c)  $4,5 < F_{r1} < 9,0$ : Ressalto estável – Dissipação de energia entre 45 e 70% (Peterka, 1963), são estáveis e controlados, mantendo parte da turbulência dentro de si, sendo a superfície da água relativamente calma (Alves, 2008);
- d)  $F_{r1} > 9,0$ : Ressalto Efetivo - Alta taxa de dissipação de energia, até 85%, apresentando grande turbulência e agitação da superfície que se propagam por longa distância.

FIGURA 5 - CLASSIFICAÇÃO DO RESSALTO HIDRÁULICO SEGUNDO O NÚMERO DE FROUDE



FONTE: Adaptado de Peterka (1963)

### 2.2.3 Comprimento do ressalto hidráulico

A determinação do comprimento do ressalto hidráulico é essencial para o dimensionamento da bacia de dissipação. A definição do final do ressalto hidráulico no entretanto, não é consenso na literatura, além da dificuldade da medição desses valores devido à natureza turbulenta do fenômeno.

Para Elevatorski (1959), o final do ressalto se caracteriza pela inexistência de variações de níveis.

Peterka (1963) definiu o fim do ressalto hidráulico de duas maneiras: na seção onde o jato de maior velocidade começa a se afastar do fundo do canal, ou no ponto imediatamente a jusante de onde termina o rolo superficial, considerando o que resulta em maior comprimento.

Já Rajaratnam (1967) determinou o final do ressalto como a seção onde a superfície média da água atinge a máxima profundidade e torna-se constante.

Marques *et al* (1997) sugere como final do ressalto a posição na qual terminam as perturbações causadas pelo fenômeno.

São várias as equações de comprimento de ressalto hidráulico determinadas por diferentes autores em diversa épocas. SENTÜRK, 1994 *apud* ALVES, 2008, afirma que as mais utilizadas são as de Smetana (1934), Peterka (1957) e Elevatorski (1959), com resultados próximos, apresentadas a seguir na TABELA 1

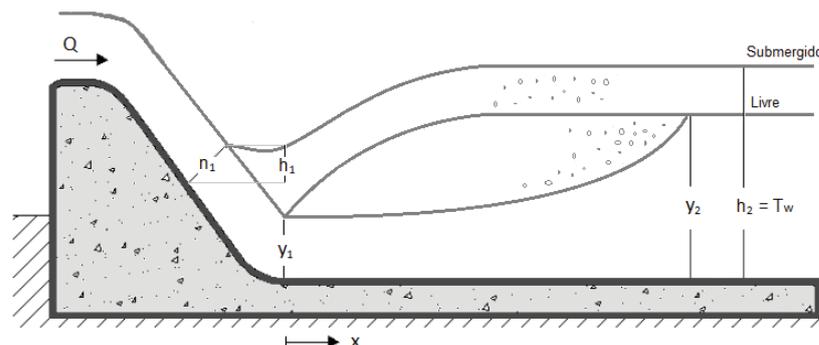
TABELA 1 - EQUAÇÕES PARA DETERMINAÇÃO DE COMPRIMENTO DO RESSALTO HIDRÁULICO

Autor	Equação
Smetana (1934)	$L_{RH} \approx 6 \cdot (Y_2 - Y_1)$
Peterka (1957)	$L_{RH} = 6,1 \cdot Y_2, 4,5 \leq Fr_1 \leq 9$
Elevatorski (1959)	$L_{RH} = 6,9 \cdot (Y_2 - Y_1)$

#### 2.2.4 Grau de submergência do ressalto hidráulico

O ressalto hidráulico pode ser classificado ainda quanto ao seu grau de submergência. Quando o nível de jusante ( $T_w$ ) é maior que a profundidade do escoamento a jusante do ressalto quando livre ( $Y_2$ ), o ressalto é classificado como afogado, ou submerso. A FIGURA 6 representa esquematicamente essa situação.

FIGURA 6 - RESSALTO HIDRÁULICO LIVRE E SUBMERGIDO



FONTE: Adaptado de Peterka (1963)

Marques *et al.* (1999) propuseram uma relação para o cálculo do grau de submergência ( $S$ ), ou afogamento, correspondente à razão entre a altura da lâmina de água a jusante do ressalto hidráulico ( $T_w$ ) e a altura conjugada do ressalto hidráulico livre ( $Y_2$ ).

$$S = \frac{T_w}{Y_2} \quad \text{Equação 2.2}$$

A capacidade de descarga em vertedouros com afogamento por jusante é um assunto já amplamente estudado, e o *U.S. Army Corps of Engineers* (1977) recomenda que seja utilizada a seguinte fórmula para cálculo da descarga de vertedouros nessa condição:

$$q = C_s h_s \sqrt{2gh} \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$q$  [ $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ ]: vazão específica;

$C_s$  [-]: coeficiente de descarga afogado;

$h_s$  [m]: diferença de elevação entre o nível de água de jusante e a crista da soleira;

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

$h$  [m]: desnível entre o nível de água no reservatório e o nível de água de jusante.

### 2.3 COMPORTAS AFOGADAS POR JUSANTE – ESFORÇOS HIDRODINÂMICOS ATUANTES

Muito provavelmente por não ser um problema recorrente nas obras de engenharia até um passado recente, não foram encontrados muitos trabalhos científicos, especificamente, sobre esforços atuantes na viga inferior de comportas afogadas por jusante devido ao impacto de ondas de ressalto hidráulico. Serão apresentadas aqui as publicações que mais se assemelham ao tema.

No Brasil, o projeto de comportas é normatizado pela NBR 8883 - Cálculo e Fabricação de Comportas Hidráulicas (ABNT, 2002). Esta norma não apresenta metodologias de estimativa de esforços hidrodinâmicos, limitando-se a indicar que estes devem ser obtidos em ensaios em modelo reduzido ou por métodos analíticos.

Uma das publicações de maior relevância para o dimensionamento de comportas em língua portuguesa é o livro *Comportas Hidráulicas* (Erbisti, 2002), onde são apresentados os principais aspectos referentes a comportas hidráulicas tais como: tipos, seleção de comportas, materiais de construção, esforços estáticos e hidrodinâmicos, esforços de manobra, sistemas de acionamento e outros elementos construtivos (ranhuras, peças fixas, vedações etc.). Com relação aos esforços hidrodinâmicos, o livro possui um capítulo específico abordando principalmente esforços hidrodinâmicos em comportas planas de fundo (tomadas de água e descargas de fundo), que usualmente são submetidas a esforços hidrodinâmicos de alta relevância (*downpull* e *uplift*), e descreve os principais métodos de ensaios em modelo reduzido. Não é mencionado, entretanto, nada sobre esforços hidrodinâmicos em comportas segmento de vertedouros de superfície afogados por jusante.

Estudos de ações hidrodinâmicas em comportas planas é relativamente mais frequente. Naudascher (1991) estudou os esforços atuantes na viga inferior da comporta com diferentes níveis de submersão a jusante, e concluiu que o esforço *downpull* aumenta significativamente à medida que o escoamento atinge a viga inferior da comporta.

Na publicação de Daniel e Paulus (2019), *Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Projects*, os autores chegam a mencionar operações de vertedouros de baixa queda em que o ressalto a jusante atinge a borda inferior da comporta, ao expandir uma situação de comportas utilizadas em sistemas de gerenciamento de inundações na Alemanha e na Holanda em que existem duas linhas de comportas - uma voltada para o mar e outra para o rio, sendo que o paramento é voltado para o mar em ambas as linhas, salientando a importância em considerar o caso em que o lado côncavo da comporta fica parcialmente submerso. Neste trabalho discute-se sobre o efeito das ondas induzidas pelos ventos e navios, fenômenos do efeito de ondas em comportas (se aproximando e onda longa causando o galgamento da comporta), e sobre o impacto de ondas do mar no paramento da comporta, porém não são feitas observações sobre como determinar o impacto de ondas de ressalto hidráulico nas comportas segmento com afogamento por jusante.

No manual *Design of Spillway Tainter Gates* da *U.S. Army Corps of Engineers* (USACE, 2000), há uma menção de problemas com o impacto de entulhos acumulados em casos de submersão a jusante, sugerindo que seja providenciada

proteção contra entulhos nas estruturas extremas e nas vigas, a fim de evitar danos por impacto e acúmulo de materiais.

Mesma preocupação com entulhos é colocada por Lewin (2001) no livro *Hydraulic Gates and Valves: In Free Surface Flow and Submerged Outlets*. Neste livro, além da questão do entulho, o autor menciona especificamente a ausência de estudos sobre o esforço causado pelo ressalto hidráulico, prevendo problemas nos elementos estruturais posicionados na parte inferior do paramento. Na mesma publicação, o autor cita dois trabalhos que estudaram o efeito da turbulência a jusante de uma comporta fechada, devido ao escoamento de comportas adjacentes.

Em operações multi-comportas, o escoamento afogado de uma das comportas, quando a comporta adjacente está fechada, pode retornar para a bacia de dissipação inoperante e causar uma perturbação periódica, que pode agir em peças estruturais submersas da face de jusante da comporta inoperante, resultando em oscilações dessa estrutura. Essas oscilações ocorreriam quando o desnível montante-jusante é relativamente pequeno e a vazão é controlada pelos níveis de jusante. Em um vertedouro com duas comportas radiais automáticas, o pilar entre as duas comportas estendia-se em 15,75 m a jusante da soleira e precisou ser estendido por mais 8 m para evitar as oscilações mencionadas (HITE, J. E., PICKERING, G. A., 1983, *apud* LEWIN, 2001).

As oscilações podem causar um pequeno salto (*bouncing*) das comportas radiais devido as ondas que retornam para dentro do vão e atingem a viga inferior das comportas. O escoamento é intenso o suficiente para levantar as comportas causando o fenômeno de “*bouncing*” dessas estruturas. O prolongamento dos pilares teria reduzido os esforços nas comportas. Oscilação do escoamento também foi notada em outros estudos em modelo (GRACE, J. L., 1964, *apud* LEWIN, 2001)

Dentre os trabalhos mais próximos ao tema da pesquisa, tem-se os estudos de Novak *et al.* (2017), e, em especial, o de Nardy, Pedrazzi e Maia (2014).

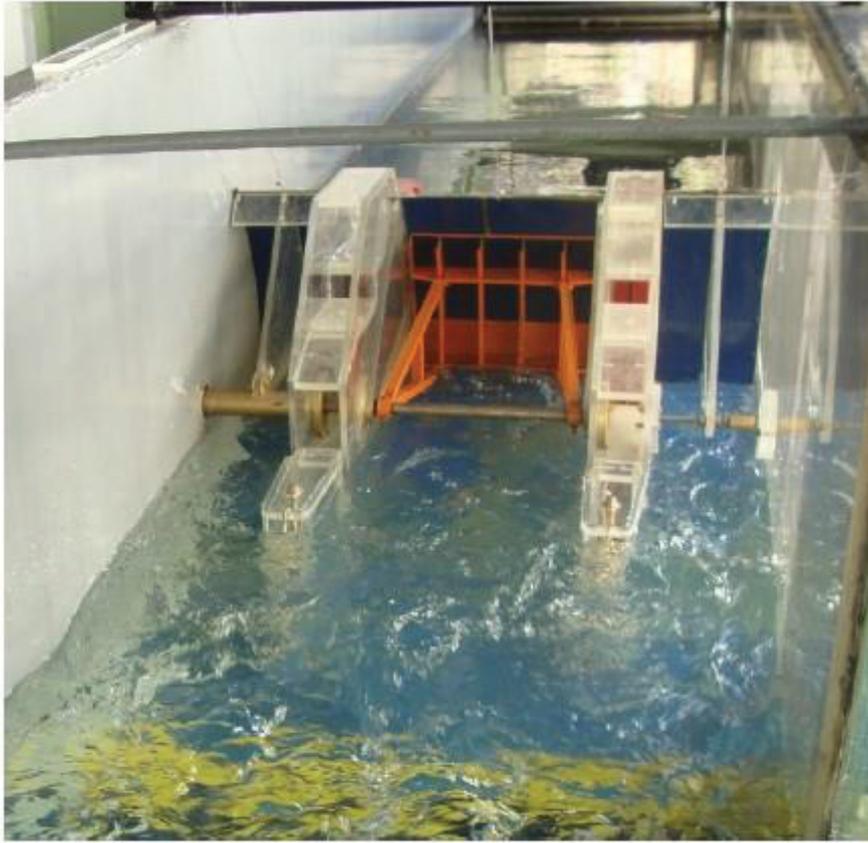
Novak *et al.* (2017) realizaram ensaios em um modelo físico de comporta segmento de um aproveitamento implantado, na escala geométrica de 1:17, a fim de determinar as diferenças nos esforços durante os processos de abertura e fechamento, com velocidades variando de 0,1 a 1,1 m/min, considerando diferentes níveis de água a jusante, vislumbrando a condição de afogamento devido a implantação de uma barragem a jusante do aproveitamento analisado. Imaginava-se que a combinação desse novo cenário com determinadas descargas e aberturas

puddessem causar instabilidade nas comportas. Foram registrados esforços no munhão e na haste do servomotor, configurada por um cabo fixado aos braços da comporta, permitindo registrar os esforços de tração. Com relação aos níveis de jusante, o estudo conclui que as forças registradas pela haste resultaram muito inferiores para altas condições de submergência.

No único trabalho encontrado que aborda o tema de esforços hidrodinâmicos em comportas afogadas por jusante, Nardy, Pedrazzi e Maia (2014), apresentaram um estudo em modelo físico reduzido bidimensional do vertedouro da UHE Jirau. Este aproveitamento situa-se no rio Madeira, a montante da UHE Santo Antônio e apresenta um afogamento por jusante de cerca de 9,0 m no nível máximo normal. O modelo foi construído na escala 1:60, e pode ser observado na FIGURA 7. A instrumentação foi realizada com sensores células de carga implantadas na parte móvel do modelo. Foi possível identificar os esforços atuantes na viga horizontal da comporta segmento em função da submergência e da abertura, apontando que, para uma determinada abertura, os esforços são decrescentes conforme o aumento do nível de submergência. Os esforços hidrodinâmicos chegaram a cerca de 21% do peso da comporta, o que foi considerando relevante. Segundo o autor, esse valor representou 56% do momento do peso próprio da comporta, o que teria influência no dimensionamento estrutural e do sistema de acionamento, sendo a recomendação de que se revisasse as Leis de Manobra das comportas.

O artigo não comenta a respeito do uso de outras metodologias de medição dos esforços.

FIGURA 7 - MODELO REDUZIDO DA COMPORTA DE JIRAU



FONTE: Nardy, Pedrazzi e Maia (2014)

## 2.4 MODELAGEM FÍSICA

Estudos experimentais em protótipo são amplamente utilizados para solucionar problemas que envolvem a mecânica dos fluídos de forma assertiva, sendo também utilizados para validar soluções analíticas para um problema e para calibragem de modelos computacionais.

Quando a realização dos experimentos em protótipo é inviável, são executados testes em modelos reduzidos, dado o seu menor custo operacional. Segundo White (2011), os modelos físicos em escala reduzida devem seguir a teoria da semelhança dinâmica, que estabelece que dois fluidos possuem escoamentos dinamicamente semelhantes se condições de semelhança geométrica, cinética e dinâmica forem atendidos. Ou seja, esses modelos devem ser correlacionados aos protótipos por leis de semelhança conhecidas, de forma que as medições efetuadas nos modelos possam ser transpostas para os protótipos.

### 2.4.1 Critérios de Semelhança

Segundo Fox e McDonald (2001), as três condições de semelhança se verificam quando:

- semelhança geométrica: quando as dimensões lineares (comprimento, área e volume) entre o modelo e o protótipo estão correlacionadas por um fator de escala constante;
- semelhança cinemática: quando as velocidades em pontos correspondentes estão no mesmo sentido e se relacionam por um fator de escala constante;
- semelhança dinâmica: quando os valores absolutos das forças, em pontos equivalentes dos dois sistemas, relacionam-se por meio de uma escala constante; os requisitos da semelhança dinâmica são os mais restritivos e exigem que os regimes de escoamento sejam os mesmos para o modelo e o protótipo, sendo necessário manter as relações entre as forças homólogas.

Sabendo-se as grandezas físicas envolvidas no processo, é possível aplicar a Teoria dos  $\pi$  de Buckingham, que permite identificar parâmetros adimensionais que devem manter-se invariáveis. Esses parâmetros são advindos de  $n$  componentes (viscosidade, força, velocidade etc.) que podem ser representados por suas  $r$  dimensões, como comprimento, massa e tempo – L, M e T, respectivamente. Assim, a quantidade dos parâmetros adimensionais  $\pi$  é igual a  $p = n - r$ . O método é utilizado para calcular conjuntos de parâmetros adimensionais a fim de simplificar a solução de problemas ou até mesmo resolvê-los, mesmo se um processo físico for desconhecido. Para escoamentos que ocorrem em obras hidráulicas, ressaltam-se os números de Froude (Fr), Reynolds (Re), Mach (Ma), Weber (We) e Euler (Eu).

No caso dessa pesquisa, em que o escoamento ocorre em superfície, o número adimensional que deve permanecer constante é o de Froude.

O número de Froude é utilizado quando as forças gravitacionais (caracterizada pela aceleração da gravidade  $g$ ) no fluxo são de maior predominância, possuindo grande importância nos estudos de canais. Isso ocorre pois ele define o regime de escoamento ( $Fr = 1$  : escoamento crítico,  $Fr < 1$  : subcrítico, e

$Fr > 1$  : escoamento supercrítico) e pode ser interpretado como a razão entre as forças de inércia e de gravidade (FOX; MCDONALD, 2001; FREITAS; MICHELS; PASSOS, 2015).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} = \frac{\text{Força de Inércia}}{\text{Força de Gravidade}}, \quad \text{Equação 2.3}$$

Onde:

$V$  [m/s] : velocidade do escoamento;

$g$  [m/s<sup>2</sup>] : aceleração da gravidade;

$L$  [m] : dimensão característica.

A TABELA 2 apresenta as relações de escala em função da escala geométrica ( $\lambda$ ) para um mesmo fluido no modelo e no protótipo, quando utilizado o grupo adimensional do número de Froude como critério de semelhança.

TABELA 2 - RELAÇÃO DE ESCALA EM FUNÇÃO DA ESCALA GEOMÉTRICA ( $\lambda$ )

Grandeza	Escala
Distância	$\lambda$
Área	$\lambda^2$
Volume	$\lambda^3$
Velocidade	$\lambda^{1/2}$
Tempo	$\lambda^{1/2}$
Aceleração	1
Vazão	$\lambda^{5/2}$
Vazão específica	$\lambda^{3/2}$

#### 2.4.2 Definição da escala

A definição da escala do modelo é de grande relevância e um dos desafios da modelagem física, uma vez que quanto menor o tamanho, menor a magnitude dos parâmetros de interesse. Ainda, quando a escala do modelo é muito menor que a do protótipo, a escala reduzida permite a ocorrência de processos adicionais que afetam a semelhança do modelo, denominados efeitos de escala. No entanto, o modelo deve ser viável, sendo levados em consideração ainda a área disponível para construção,

as características específicas do modelo, tais como carga hidráulica, vazão, altura, e instrumentos que serão utilizados durante o processo.

Teixeira *et al.* (2012) analisaram os efeitos de escala e de laboratório nos valores médios de pressão junto ao fundo de bacias de dissipação por ressalto hidráulico, comparando medições realizadas em modelos físicos reduzidos em escala 1:100, 1:50 e 1:32 e no protótipo UHE Porto Colômbia. Analisando os resultados desse estudo com outro que contemplou um modelo tridimensional, concluiu-se que não existe efeito significativo da tridimensionalidade sobre os valores de pressão média. No entanto, os valores da pressão média obtidos nos modelos reduzidos foram maiores que no protótipo, sendo essa diferença inversamente proporcional à escala do modelo. Supõe-se que essa diferença seja devido à menor incorporação de ar nos modelos, principalmente no trecho inicial do ressalto, além de estar associado ao raio de curvatura e da instabilidade da posição de início do ressalto. Por fim, sugeriu-se que fossem utilizados modelos 1:40 para casos em que uma dispersão no valor da pressão média de 25% possa ser aceitável, e em torno da escala 1:20, para modelos com relações  $Fr_1 \cdot S$  inferiores a 20.

Nardy, Pedrazzi e Maia (2014) utilizaram em seu estudo um modelo reduzido parcial bidimensional construído na escala geométrica 1:60, em que foi possível verificar os esforços atuantes na viga horizontal da comporta em função da submergência e da abertura parcial.

Novak *et al.* (2017) utilizou a escala geométrica 1:17 no modelo físico para a determinação dos esforços hidrodinâmicos durante a movimentação de uma comporta segmento em diferentes velocidades.

Neste estudo, para estimativa de esforços gerados pelo impacto das ondas do ressalto hidráulico na viga inferior das comportas segmento, optou-se por utilizar a escala 1:25, em um modelo bidimensional.

## 2.5 MEDIÇÕES DE ESFORÇOS

Das referências que mais se assemelham ao trabalho proposto, com relação a medições de esforços em comportas segmento afogadas, verifica-se que Nardy, Pedrazzi e Maia (2014) realizaram os ensaios para medição dos esforços atuantes na viga horizontal da comporta segmento utilizando células de carga. Já Novak *et al.* (2017), utilizaram *strain gages* para medição dos esforços atuantes no munhão e na haste do servo motor. Os estudos, no entanto, não discorrem sobre o uso de outras técnicas de medição, aquisição e processamento de dados, de modo que não se pode concluir a vantagem ou desvantagem da utilização dessas técnicas de instrumentação.

Ao buscar por estudos com características comuns com o presente trabalho, como a intermitência dos eventos e conseqüente alteração repentina gás/líquido, verificou-se que pesquisas de proteção costeira e *sloshing* relacionam os sensores eletrônicos de pressão como instrumentos principais nos experimentos.

### 2.5.1 Sensores eletrônicos de pressão

Os sensores eletrônicos de pressão são instrumentos comumente utilizados em estudos experimentais. Existe uma grande variedade de sensores e, para definição do equipamento mais adequado, deve ser considerar a faixa de medição de pressão, conexão elétrica, sinal de saída e precisão de medição (GASSMANN; GRIES, 2010).

O termo “sensor de pressão” é um termo genérico que descreve qualquer tipo de dispositivo capaz de medir pressão e fornecer um sinal de saída de resposta. Segundo Abacus (2019), os sensores podem ser divididos em transdutores ou transmissores, de acordo com a interface da saída do dispositivo. O sinal de saída dos transdutores é referente à tensão elétrica (volt), e o sinal de saída dos transmissores é referente à corrente elétrica (ampère).

Os transmissores de pressão tem sinal de saída de baixa impedância, o que fornece boa resistência à interferência de ruídos elétricos, facilitando sua utilização no ambiente industrial e permitindo seu uso em situações quando é necessária a transmissão do sinal em longas distâncias.

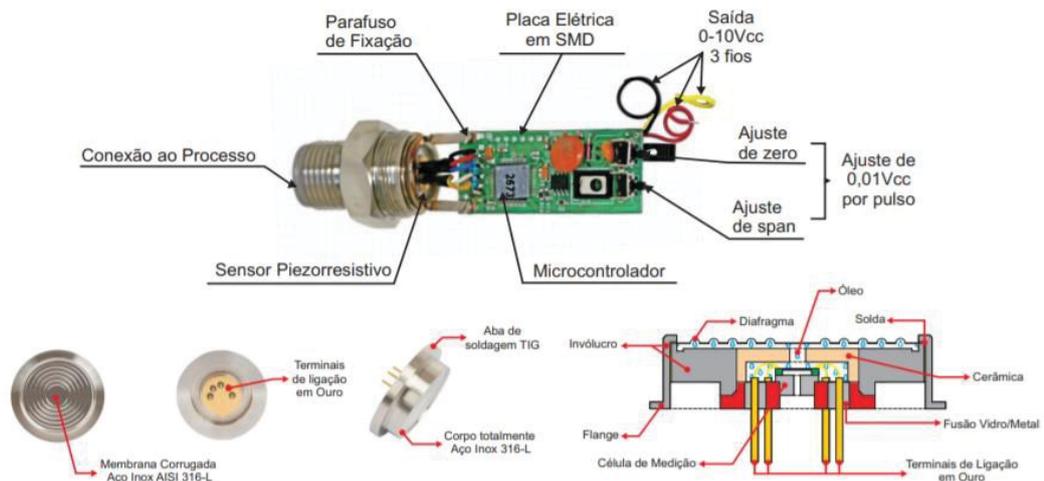
Já os transdutores tem a vantagem de apresentar um circuito elétrico simples, permitindo o ajuste para cada aplicação, além de reduzir custos e dimensões.

Para realizar a medição eletrônica de pressão, um transdutor precisa detectar a sua variação e convertê-la com precisão e repetibilidade em um sinal elétrico utilizando um princípio físico (GASMANN; GRIES, 2010). Existem vários tipos de tecnologias utilizadas em transdutores de pressão, entretanto os princípios de medição piezo-resistivo e piezoelétrico se tornaram bem estabelecidos na prática (KISTLER, 2018).

O efeito piezo-resistivo corresponde a uma alteração na resistividade elétrica do material quando uma carga mecânica é aplicada. A medição a partir da resistividade elétrica é realizada através de um diafragma (superfície fina) que deflexiona sob pressão. O grau de deflexão é medido por quatro dispositivos medidores de deformação feitos com material semiconductor integrados ao diafragma e ligados a uma ponte de Wheatstone (JAN HJELMGREN, 2002).

Na FIGURA 8 pode-se observar os componentes de um transdutor eletrônico de pressão.

FIGURA 8 - TRANSDUTOR ELETRÔNICO DE PRESSÃO DA FABRICANTE ZÜRICH



FONTE: Zürich (2021)

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados nos estudos experimentais em modelo físico reduzido.

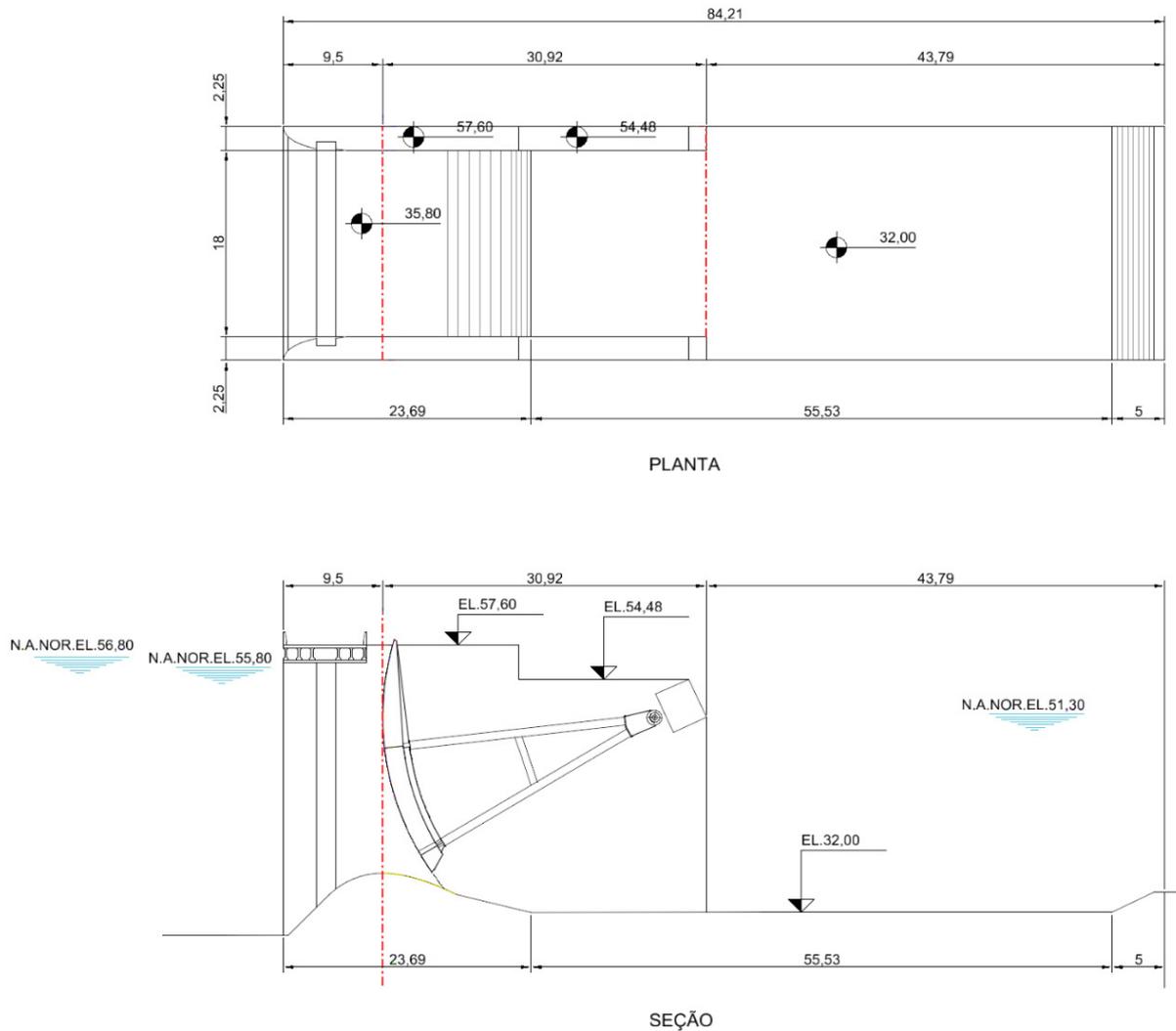
#### 3.1 DEFINIÇÃO DO PROJETO PILOTO

O projeto piloto foi definido de maneira a representar as características de um vertedouro de baixa queda.

Foi considerado um vertedouro de 6 m de altura, com crista na El. 35,8 m, sendo o canal de aproximação na El. 29,80 m. O vão foi definido com 18 m de largura e carga de projeto de 15,75 m. O trecho de montante foi projetado com inclinação de 1:1, combinada com um raio de 7,32 m. Dessa forma, utilizando a metodologia do *United States Army Corps of Engineers* (1988), o paramento de jusante ficou definido por  $y = 0,06779605 \cdot x^{1,75}$ . A fim de evitar a separação do escoamento, foi projetado um preenchimento no trecho entre o pé da soleira e o início da bacia de dissipação. A bacia de dissipação foi posicionada na El. 32,00 m e canal de restituição na El. 34,00 m.

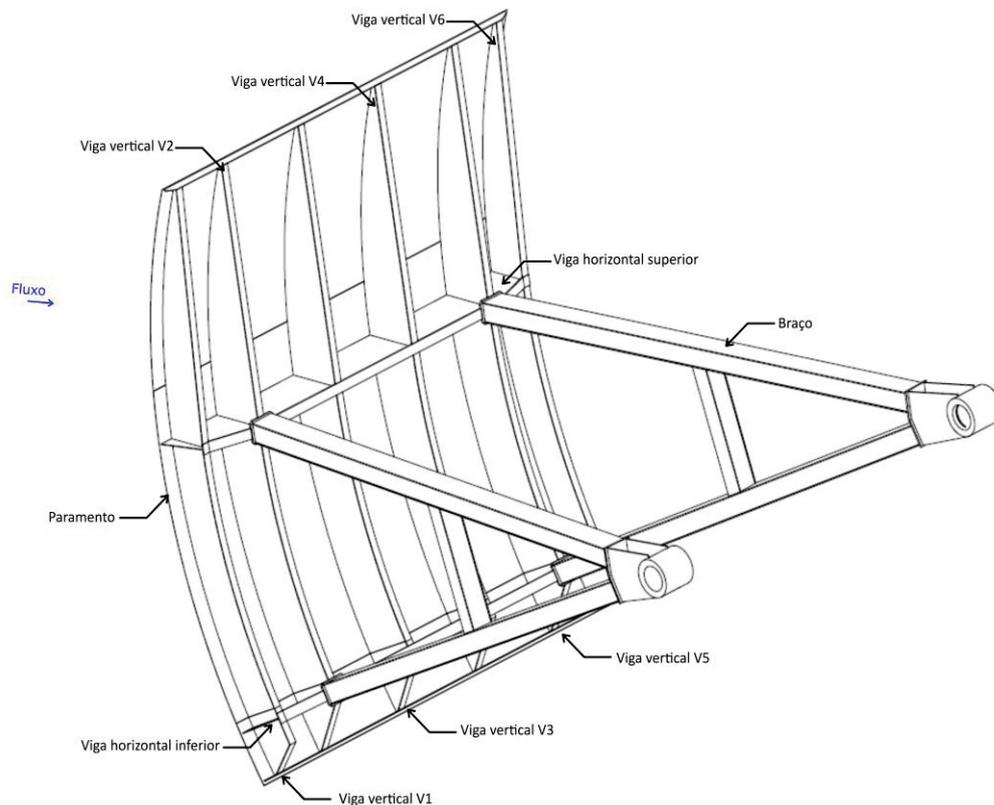
A comporta segmento foi definida com vão de 18,00 m e raio externo de 26,0 m. Os pilares foram definidos com largura de 4,5 m, e o munhão com dimensões de 3,5 m de base, 4,0 m de altura, com centro na El. 50,80 m e ponto de assentamento da comporta na soleira na El. 34,27 m, como pode ser observado na seção da FIGURA 9.

FIGURA 9 - VERTEDOURO - PROJETO PILOTO



As comportas foram mecanicamente projetadas conforme orienta a NBR 8883/2008 – Cálculo de Comportas Hidráulicas. O desenho da comporta e suas estruturas principais: paramento, vigas verticais, vigas horizontais e braços, são apresentados na FIGURA 10.

FIGURA 10 - PROJETO TRIDIMENSIONAL DA COMPORTA SEGMENTO



### 3.2 INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTAÇÃO

O modelo reduzido foi construído no laboratório do Centro de Hidráulica e Hidrologia Professor Parigot de Souza (CEHPAR).

Após a execução de alguns ensaios exploratórios comparativos considerando a representação de um vão e dois meios pilares ou de dois meios vãos, verificou-se que os ensaios na representação de apenas um vão conduziram à formação de um ressalto hidráulico mais estável, enquanto na representação de dois meios vãos conduziram a condições de escoamento distintas a jusante, criando incertezas em relação à vazão vertida por cada vão. Além disso, a configuração de um vão permite uma instrumentação detalhada da comporta, uma vez que as instalações podem ser inseridas nas paredes do canal, onde há mais espaço que no interior dos pilares. Dessa forma, optou-se pela configuração do modelo com um vão e dois meios pilares.

Com base no projeto piloto e na necessidade de instrumentação do modelo, o modelo reduzido foi projetado na escala 1:25, conforme critério de semelhança de Froude, de acordo com as escaladas da TABELA 3 a seguir:

TABELA 3 - ESCALA DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS CONSIDERANDO O CRITÉRIO DE SEMELHANÇA DE FROUDE

Grandeza	Escala	Valor numérico
Distância	$\lambda$	1:25
Área	$\lambda^2$	1:625
Volume	$\lambda^3$	1:15.625
Velocidade	$\lambda^{1/2}$	1:5
Tempo	$\lambda^{1/2}$	1:5
Aceleração	1	1:1
Vazão	$\lambda^{5/2}$	1:3.125
Vazão específica	$\lambda^{3/2}$	1:125
Pressão	$\lambda$	1:25

O modelo reduzido foi instalado em um canal experimental de 29,0 m de comprimento, altura de 2,30 m e largura variável – 3,07 m na região do sistema de alimentação e 1,44 m no restante do canal.

### 3.2.1 Canal experimental

O canal é composto por sistema de alimentação, canal de aproximação, soleira do vertedouro, pilares, comporta segmento, bacia de dissipação, canal de restituição e sistema de restituição.

O sistema de alimentação é composto por três tubulações dispostas centralizadamente na parte superior da caixa de alimentação, equipadas com registros e medidores de vazão e estruturas de tranquilização do fluxo capazes de fornecer vazões de até 650 l/s. Uma parede de tijolos com furos dispostos longitudinalmente ao canal foi prevista para tranquilização do fluxo, amenizado também pelo arredondamento das paredes laterais no encontro com o canal de aproximação.

O segmento principal do canal, onde é instalado o modelo físico, possui 21,87 m de comprimento, sendo 6,0 m correspondente ao trecho de aproximação,

3,37 m correspondente às estruturas do vertedouro e da bacia de dissipação, e 12,50 m de comprimento para o trecho de restituição.

Ao final do canal, o segmento de restituição foi projetado com 3,65 m, de forma a abrigar a instalação uma comporta basculante para controle do nível de água de jusante e restituição da vazão para o circuito interno de bombeamento.

Nas laterais do canal foram previstas janelas de visualização de 1,4 m de altura.

O projeto do canal experimental e as imagens da sua construção podem ser observados nas FIGURA 11 e FIGURA 12.

FIGURA 11 - PROJETO CONSTRUTIVO DO CANAL EXPERIMENTAL: PLANTA, CORTE E ELEVÇÃO

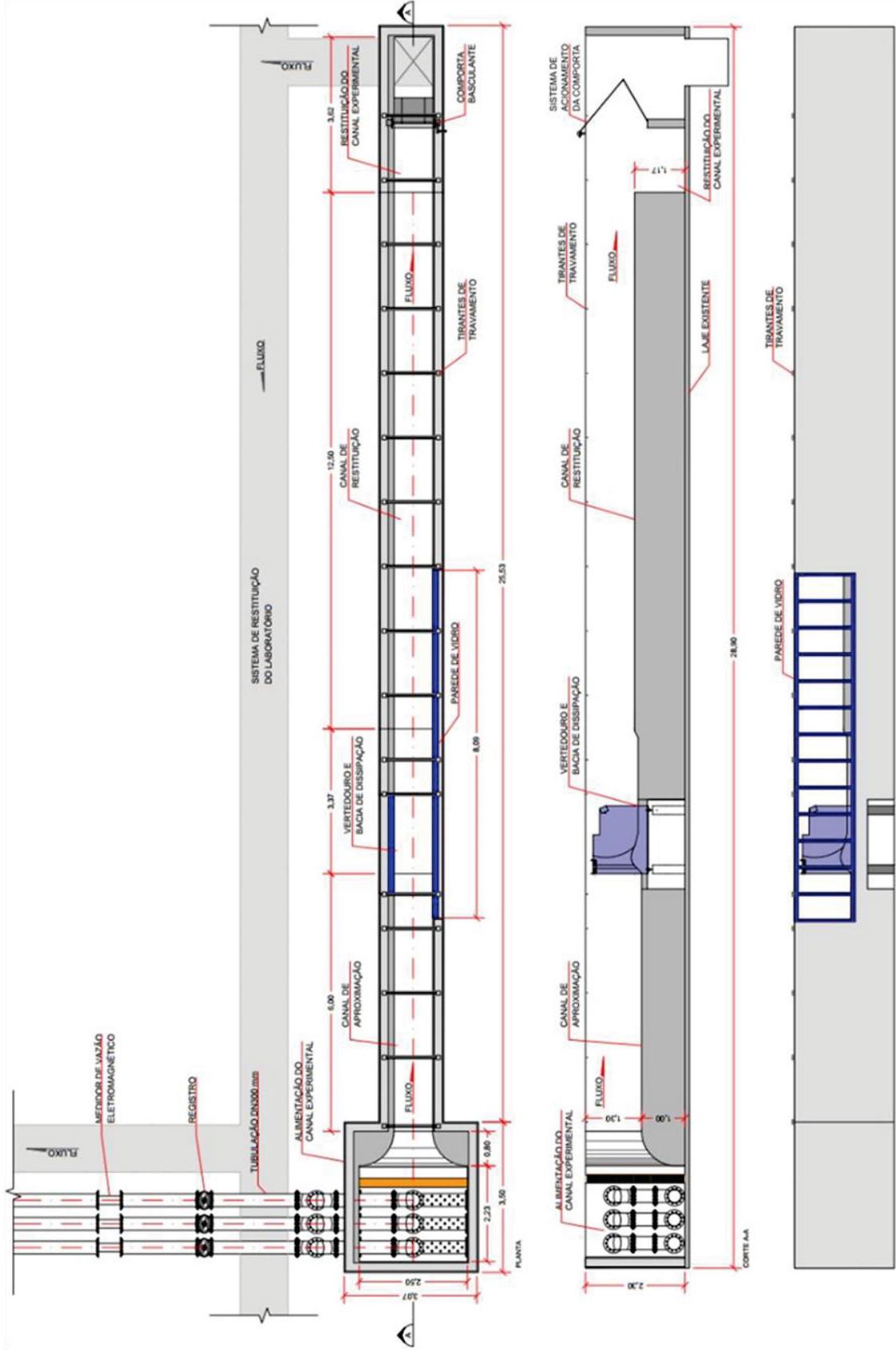


FIGURA 12 - CONSTRUÇÃO DO CANAL EXPERIMENTAL



a) Vigas Baldrame



b) Fôrmas da caixa de alimentação



b) Alvenaria e fôrmas de pilares e vigas



d) Alvenaria



e) Vista lateral parede de vidro



f) Vista superior

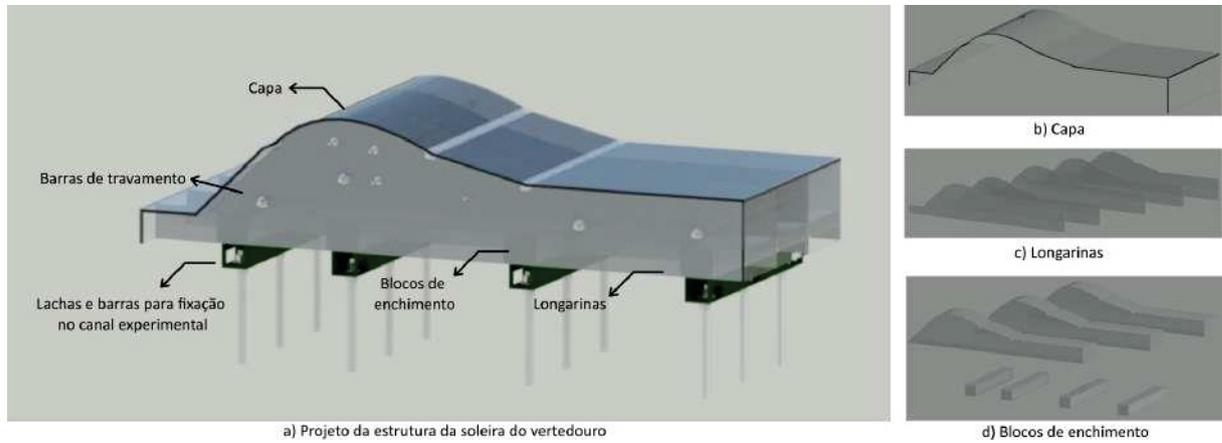
As estruturas do vertedouro, dos pilares e da comporta, relevantes nesse estudo, serão detalhadas a seguir.

### 3.2.2 Soleira

A soleira do vertedouro foi construída em acrílico, a partir de moldes de MDF, estruturadas com peças tipo longarinas, também em acrílico, preenchida com blocos

de enchimento a fim de evitar eventuais vibrações. Essas três peças: capa, longarinas e blocos de enchimento, pode, ser observadas na FIGURA 13.

FIGURA 13 - PEÇAS COMPONENTES DA ESTRUTURA DA SOLEIRA



A capa foi executada em chapas de acrílico de 10 mm de espessura e as longarinas em acrílico de 18 mm de espessura, bem como os blocos de enchimento, formados a partir da colagem dessas chapas.

FIGURA 14 - SOLEIRA MONTADA



### 3.2.3 Pilares

Os dois meios pilares foram reproduzidos em acrílico, com peças fixas e móveis de modo a permitir a movimentação da comporta que será fixada nessa estrutura.

FIGURA 15 – ARRANJO DA COMPORTA SEGMENTO

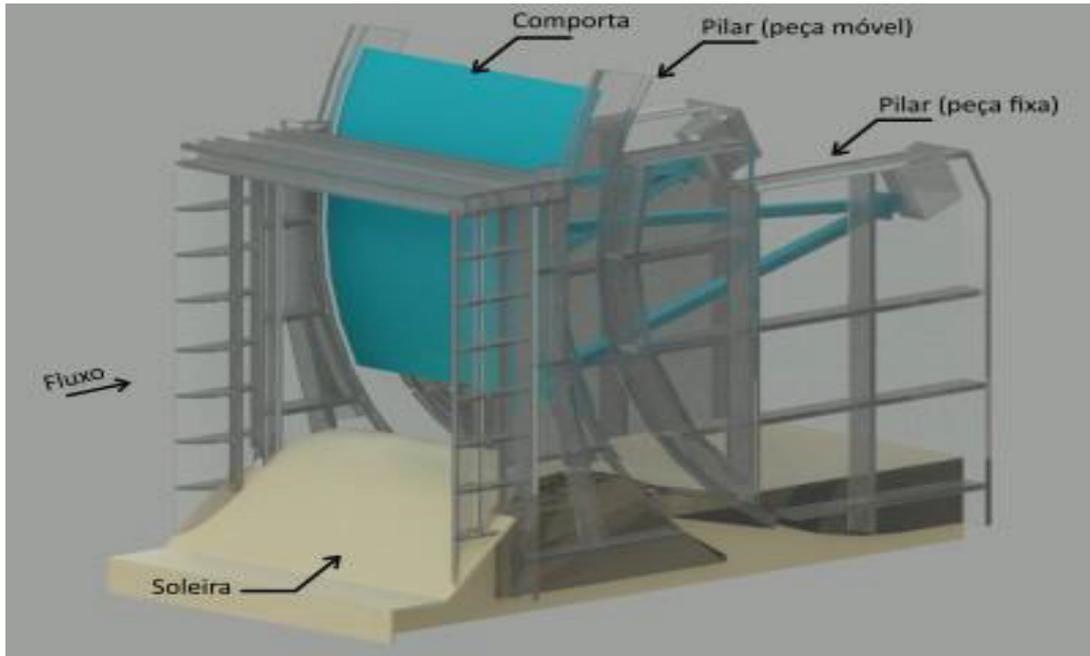
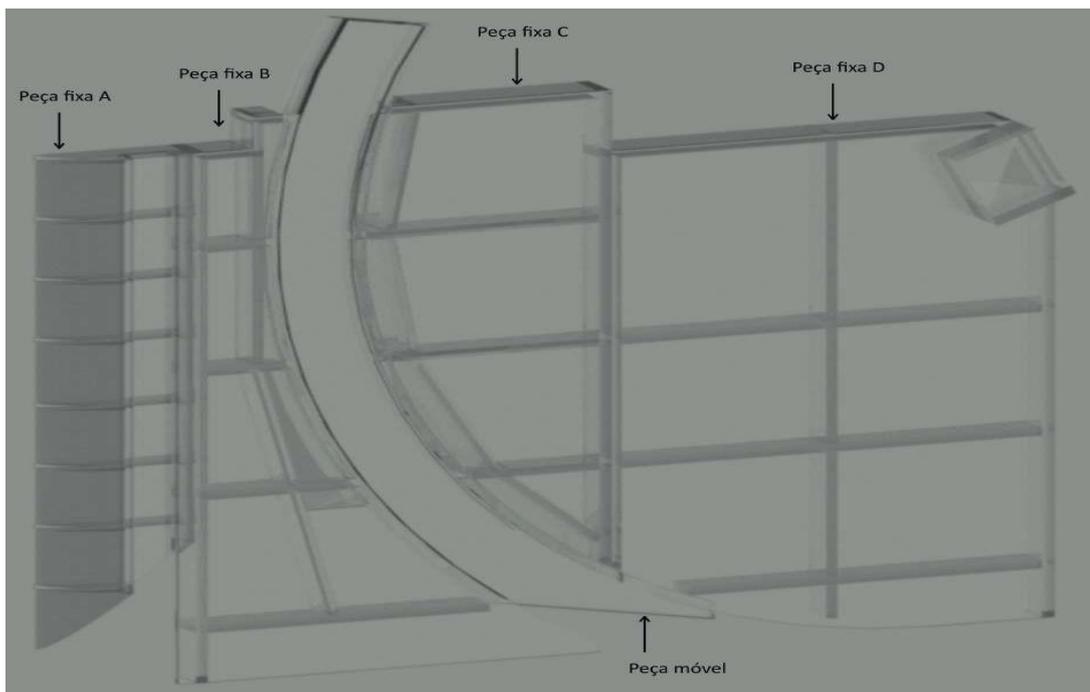


FIGURA 16 - PROJETO DO PILAR – PEÇAS FIXAS E MÓVEIS

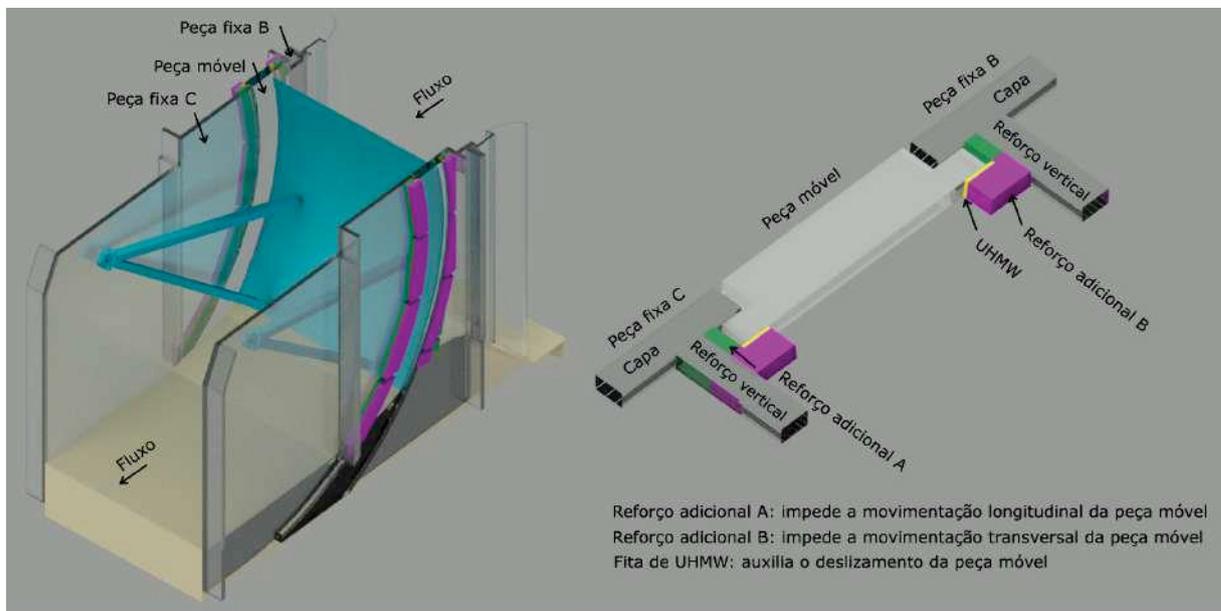


As peças fixas foram executadas com chapas de acrílico de 10 e 18 mm.

A peça móvel foi construída com chapas de acrílico de 18 mm. Para sustentação dessa peça, foram construídas estruturas de reforço para impedir a movimentação lateral e longitudinal. Ainda, para permitir o deslizamento durante o posicionamento da comporta, foram inseridas fitas de UHMW (*Ultra High Molecular Weight Polyethylene* – Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular), nas áreas de contato entre as peças fixas e móveis.

Para garantir a vedação da peça móvel e a soleira do vertedouro foi inserido um perfil de borracha na região de contato da soleira com a parte móvel do pilar.

FIGURA 17 - DETALHE DAS PEÇAS FIXAS NA REGIÃO DE CONTATO COM A PEÇA MÓVEL



a) Arranjo geral da disposição dos reforços adicionais

b) Seção transversal com detalhe dos reforços adicionais e das fitas de UHMW

FIGURA 18 - PILARES MONTADOS



### 3.2.4 Comporta

A comporta foi executada a partir de chapas de aço galvanizado com recortes e saliências realizados a laser, para garantir a precisão, de forma a encaixarem entre si. As dimensões da comporta segmento transpostas para valores de modelo resultam em espessuras da ordem de milímetros, e foram utilizadas as espessuras de chapa disponíveis mais próximas às dimensões equivalentes em escala de modelo. Além da espessura, o material precisa apresentar rigidez suficiente para suportar as condições de operação do modelo.

O paramento da comporta foi definido com espessura única de 0,50 mm, equivalente a 12,5 mm no protótipo, a fim de evitar emendas.

Os apoios dos braços junto a comporta foram projetados com espessura de 2,7 mm, correspondente a 67,5 mm em dimensões de protótipo, e possuem recortes para encaixe nas vigas verticais e horizontais. Além disso, foram adicionados recortes para encaixe de uma peça auxiliar desenvolvida para união do braço à peça de apoio.

Para representação dos braços da comporta, foram utilizados tubos de aço de seção retangular de base 40 mm e altura 30 mm, cujas dimensões em protótipo correspondem a 1,0 m e 0,75 m. O munhão foi representado com um mancal de ferro

fundido de base reta. A conexão dos braços à comporta e ao munhão foi realizada com o uso de peças em aço desenvolvidas para serem fixadas a peça de apoio e à base do munhão. Salienta-se que a movimentação e o posicionamento da comporta segmento são determinados no modelo reduzido a partir da peça móvel do pilar, ao qual o paramento está fixado. O munhão e o braço não exercem influência e não foram projetados para esse fim.

Para o projeto das peças da viga horizontal inferior foi considerado o uso dos transmissores eletrônicos de pressão. Os instrumentos possuem cerca de 20 cm de comprimento, não sendo possível sua instalação diretamente nessa estrutura. Os transmissores foram locados externamente ao modelo reduzido, nas laterais externas dos meio pilares, com o uso de microtubos de inox para conexão entre a tomada de pressão e o instrumento. Essa concepção alterou o projeto previsto para a viga inferior da comporta, resultando em uma peça de 5,9 mm de espessura.

FIGURA 19 - COMPORTA DO MODELO



a) Comporta sem acabamento



b) Processo de pintura



c) Comporta instalada no modelo reduzido

### 3.2.5 Instrumentação

Para as medições de grandezas físicas foram utilizados medidores eletromagnéticos de vazão para controle, sensores ultrassônicos para medição de níveis d'água, piezômetros e transmissores eletrônicos para medição de pressões ao longo do vertedouro e transmissores eletrônicos de pressão para medição de esforços ao longo da comporta.

#### 3.2.5.1 Medição de Vazão

Para controle da vazão de alimentação do canal experimental, foram instalados medidores eletromagnéticos, em cada uma das três linhas de recalque, constituídos por um sensor eletromagnético modelo OPTI-FLUX 20000 e um conversor eletrônico de sinais modelo IFC 050W.

#### 3.2.5.2 Medição de níveis de água

Para medição do perfil de linha de água no modelo, a jusante do escoamento, foram instalados sobre um trilho, com 40 cm de espaçamento, cinco sensores ultrassônicos, modelo MIC+35/IU/TC da marca Sense, cuja faixa de operação típica corresponde a 35 cm, sendo a faixa máxima de 60 cm.

#### 3.2.5.3 Medição de pressão na soleira do vertedouro

Com o intuito de agregar informações, o modelo reduzido foi instrumentado com 29 tomadas para medição de pressão estática (piezômetros) e 12 tomadas para medição de pressão instantânea (eletrônicos), ao longo da soleira, principalmente a região do ponto de assentamento da comporta, e na bacia de dissipação.

Os piezômetros foram previstos conforme posicionamento apresentado nas FIGURA 20 e FIGURA 21. Para sua instalação, foram executados furos com 1,0 mm de diâmetro na peça de acrílico que compõe a soleira do vertedouro, conectados por uma mangueira pneumática de poliuretano a um painel graduado.

FIGURA 20 – POSICIONAMENTO DOS PIEZÔMETROS NA SOLEIRA DO VERTEDOURO - CORTE

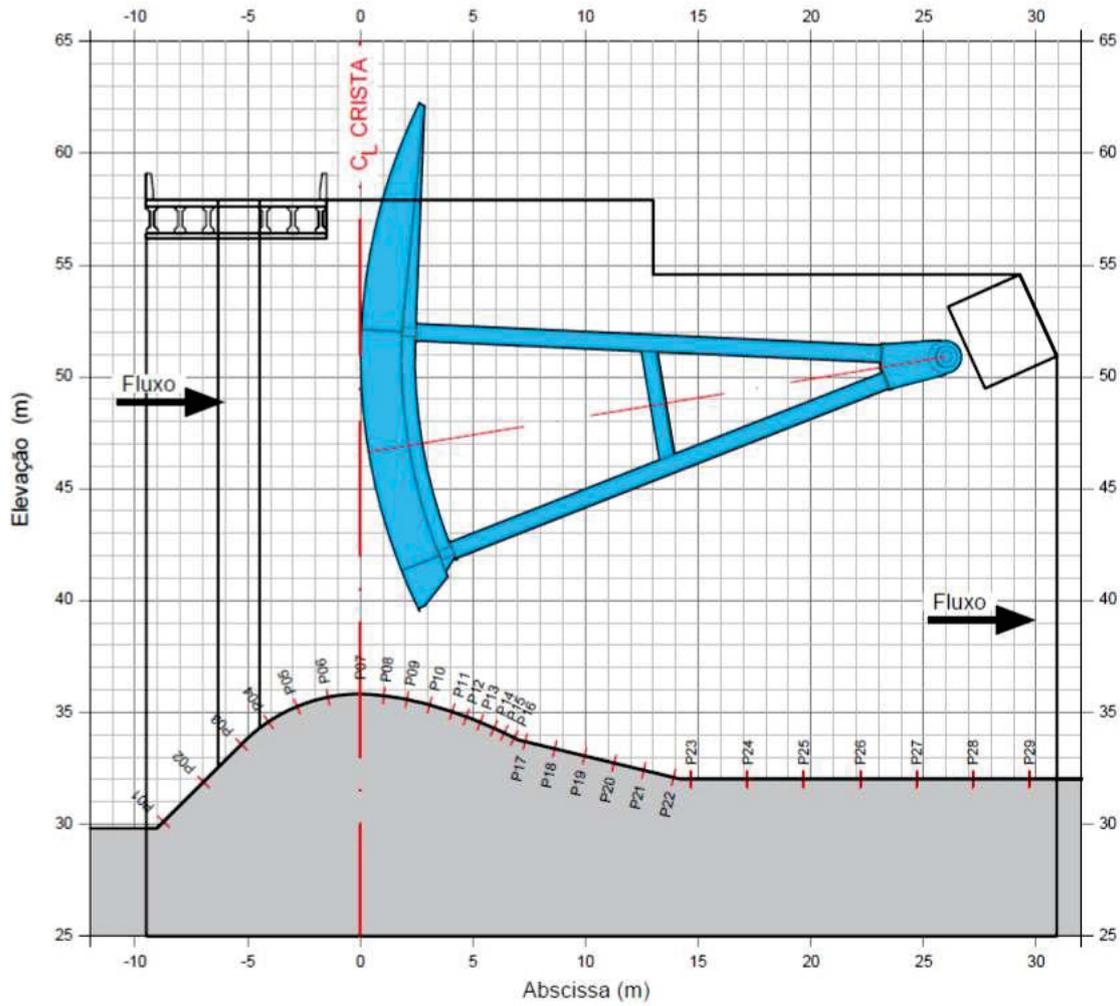
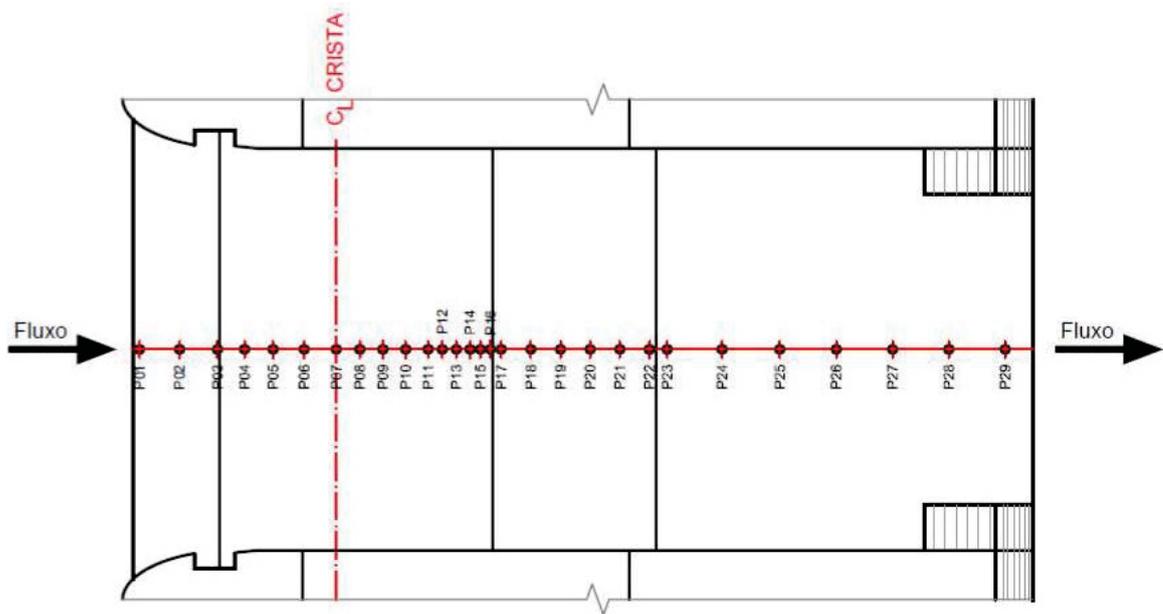


FIGURA 21 - POSICIONAMENTO DOS PIEZÔMETROS NA SOLEIRA DO VERTEDOURO - PLANTA



Os transdutores de pressão instantânea foram distribuídos em três eixos longitudinais, conforme FIGURA 22 e FIGURA 23. Os equipamentos, das fabricantes Zürich e Hyatronic, apresentam faixa de medição de -0,5 a 1,0 m.c.a. e precisão de 0,1% do fundo de escala.

FIGURA 22 - POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES NA SOLEIRA DO VERTEDOURO - CORTE

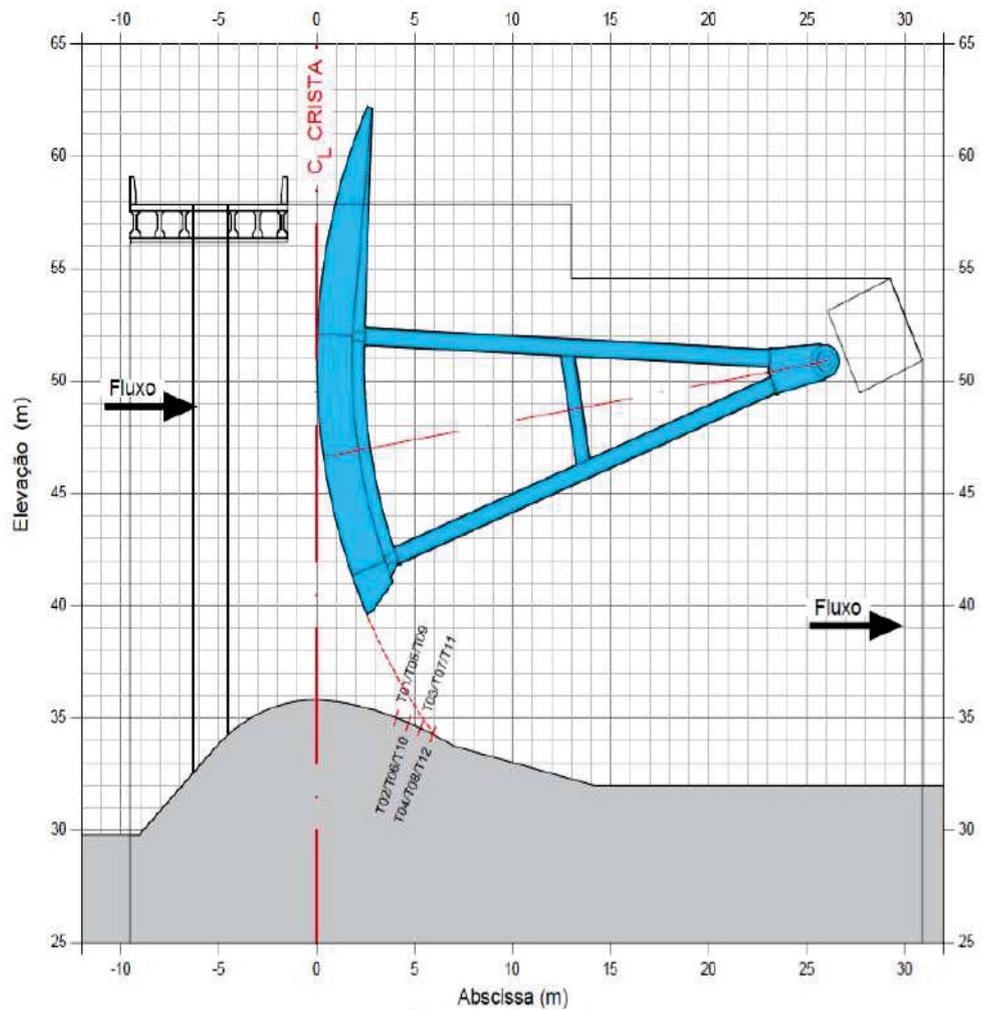
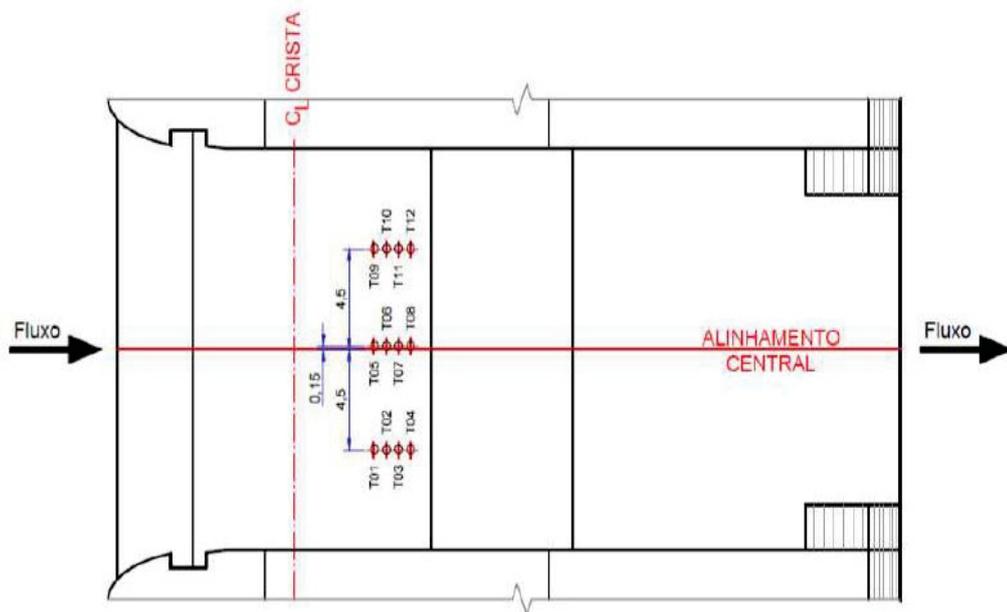


FIGURA 23 - POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES NA SOLEIRA DO VERTEDOURO - PLANTA



### 3.2.6 Medição de esforços na viga inferior da comporta segmento

Para a medição de esforços na viga inferior da comporta, parâmetro de análise desse estudo, foram previstas 32 tomadas de pressão, distribuídas ao longo das faces superior e inferior da viga, instrumentadas com transdutores eletrônicos da marca Zürich, com faixa de medição de -0,5 a 0,5 m.c.a., correspondente a variação de -12,5 m e 12,5 m em protótipo e precisão de 0,1% do fundo de escala. Os transmissores foram locados externamente ao modelo reduzido, nas laterais externas dos meio pilares, com o uso de microtubos de inox para conexão entre a tomada de pressão e o instrumento. Os microtubos possuem 2,4 mm de diâmetro e paredes com 0,45 mm de espessura, sendo instalados 16 microtubos em cada extremidade, totalizando 32 tomadas de pressão ao longo da peça. Para a proteção desses tubos, a alma da viga horizontal foi prevista com duas chapas de aço. O projeto da instrumentação na viga horizontal e o posicionamento dos sensores podem ser vistos nas FIGURA 24, FIGURA 25 e FIGURA 26.

FIGURA 24 – PROJETO DE INSTRUMENTAÇÃO DA VIGA DA COMPORTA

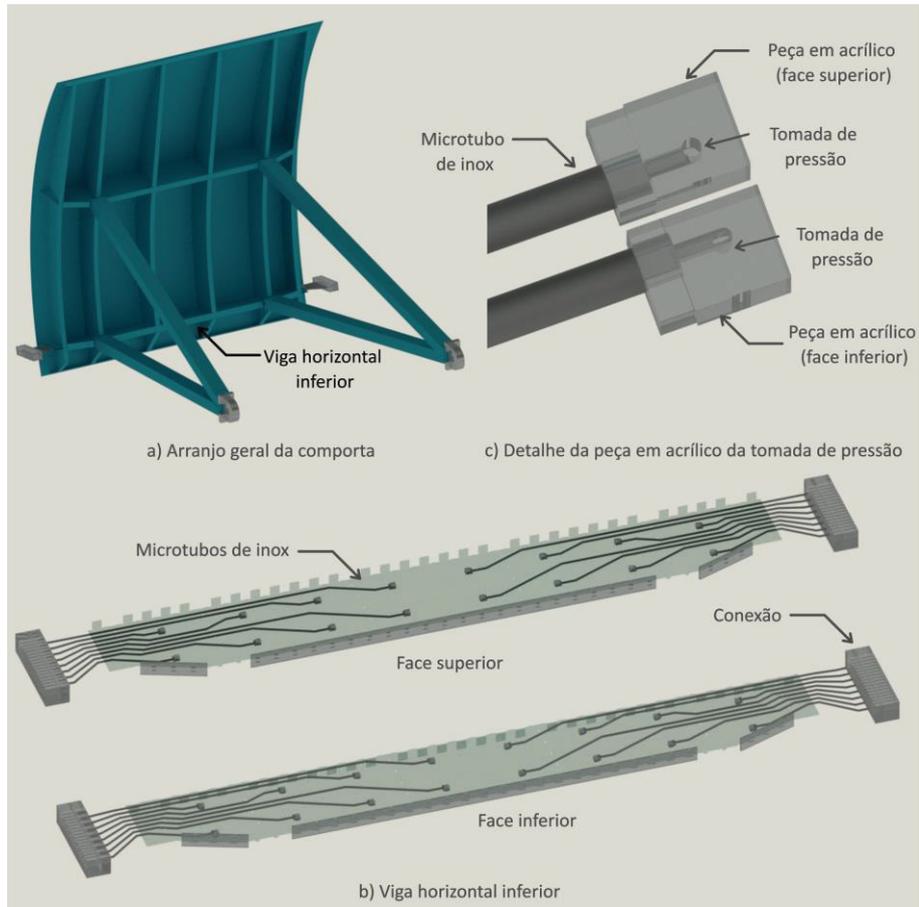


FIGURA 25 – POSICIONAMENTO DOS TRANSDUTORES NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA

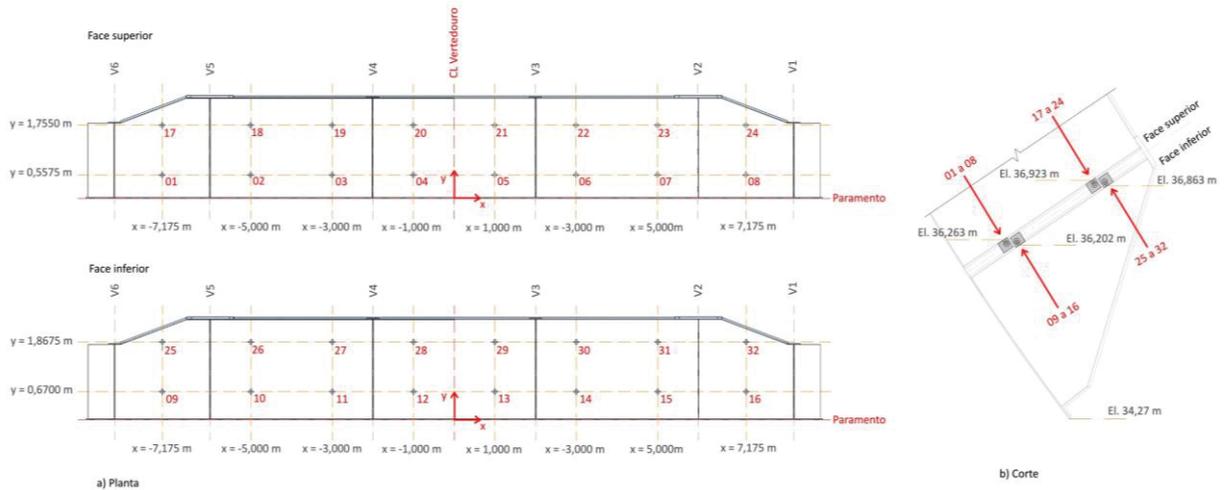


FIGURA 26 – TRANSDUTORES NO MODELO REDUZIDO



### 3.3 ENSAIOS EM MODELO REDUZIDO

Para a medição dos esforços na viga inferior da comporta, objeto do presente estudo, foram executados ensaios no modelo reduzido com duração de 3.000 segundos cada ensaio.

Para a complementação da caracterização das condições hidráulicas do escoamento, foram definidos dois parâmetros: coeficiente de descarga do vertedouro e afogamento da viga horizontal da comporta.

O coeficiente de descarga do vertedouro foi calculado conforme Equação 2.3.

Neste trabalho, definiu-se como a submergência da viga a diferença entre o nível de água médio na região da comporta e a elevação máxima da viga horizontal inferior. A partir deste parâmetro, estabeleceu-se uma caracterização do tipo do escoamento junto à viga da comporta, como segue:

- Tipo A<sub>0</sub>: escoamento não afoga a viga
- Tipo A: escoamento não afoga a viga, porém as ondas do ressalto hidráulico atingem a face inferior da viga;
- Tipo B: escoamento afoga parcialmente a viga;
- Tipo C: escoamento afoga totalmente a viga.

### 3.3.1 Ensaios

A fim de se definir as características dos ensaios para medição dos esforços na viga inferior da comporta, foram realizados ensaios preliminares para verificação das condições hidráulicas do escoamento para diferentes combinações de abertura da comporta e nível de água de jusante. Foram definidos então, os ensaios iniciais, sendo quatro aberturas ( $G_0$ ) de 1,0 m, 2,0 m, 4,0 m e 6,0 m e cinco níveis de água de jusante, de maneira a se obter diferentes comportamentos das ondas de ressalto hidráulico junto à viga inferior da comporta.

Simulações numéricas foram previamente realizadas para subsidiar a determinação dos níveis de água de jusante. As características dessas simulações estão listadas na TABELA 4. Para melhor compreensão das condições do escoamento, os dados das tabelas serão apresentados em escala de protótipo.

Os resultados das simulações numéricas foram indicativos para a limitação dos níveis de água de jusante a serem verificados nos ensaios em modelo físico.

TABELA 4 – ENSAIOS PRELIMINARES – SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

Simulação	$G_0$ (m)	$q$ (m <sup>3</sup> /s/m)	N.A.J (m)	$h_s$ (m)	$h$ (m)	$C_s$	$G_0/h_s$	$S_{viga}$ (m)
1		18,1	40,50	4,70	15,30	0,222	0,213	-
2	1,0	17,1	42,50	6,70	13,30	0,158	0,149	0,5
3		15,6	43,50	7,70	12,30	0,130	0,130	3,5
4		31,5	42,39	6,59	13,41	0,295	0,303	-
5		31,3	42,50	6,70	13,30	0,289	0,299	-
6	2,0	28,8	43,39	7,59	12,41	0,243	0,264	-
7		27,7	44,00	8,20	11,80	0,222	0,244	1,0
8		26,2	45,00	9,20	10,80	0,196	0,217	2,0
9		24,8	46,00	10,20	9,80	0,175	0,196	4,0
10		58,6	45,76	9,96	10,04	0,419	0,402	-
11	4,0	51,9	47,00	11,20	8,80	0,353	0,357	0,5
12		48,1	48,00	12,20	7,80	0,319	0,328	2,0
13		44,3	49,00	13,20	6,80	0,291	0,303	4,0
14		82,8	47,37	11,57	8,43	0,556	0,519	-
15		79,1	48,00	12,20	7,80	0,524	0,492	-
16	6,0	73,6	49,00	13,20	6,80	0,483	0,455	0,0
17		66,3	50,00	14,20	5,80	0,438	0,423	2,0
18		59,4	51,00	15,20	4,80	0,403	0,395	4,0
19		52,3	52,00	16,20	3,80	0,374	0,370	5,0

Notas:

$G_0$ : Abertura da comporta;

$q$ : vazão específica;

N.A.J.: Nível de água de jusante, medido a 330 m a jusante da crista;

$h_s$ : Diferença de elevação entre o nível de água no reservatório e a crista da soleira;

$h$ : Desnível entre o nível de água no reservatório e o nível de água de jusante;

$C_s$ : Coeficiente de descarga afogado;

$S_{viga}$ : Submergência da viga.

Com base nos resultados dos ensaios preliminares, foram escolhidos oito ensaios, destacados na TABELA 5 -CONDIÇÕES HIDRÁULICAS - ENSAIOS PRELIMINARES – MODELO FÍSICO para avaliação dos esforços causados pelas ondas do ressalto hidráulico na viga inferior da comporta, sendo dois níveis de jusante, um em condição de viga totalmente afogada (Tipo C) e outro com a viga parcialmente afogada (Tipo B), para cada abertura parcial. Estes ensaios foram denominados “Ensaio Iniciais”. Nessa etapa, além das medições de pressão ao longo da viga horizontal, também foram realizadas medições de pressão na estrutura do vertedouro com uso de piezômetros e transdutores de pressão, e os níveis de água a jusante da comporta, com uso de sensores ultrassônicos de nível.

Os ensaios tiveram duração de 5 minutos para cada condição analisada. As frequências de aquisição foram inicialmente definidas em 3, 10 20, 50, 100 e 200 Hertz.

TABELA 5 - CONDIÇÕES HIDRÁULICAS - ENSAIOS PRELIMINARES – MODELO FÍSICO

Ensaio	$G_0$ (m)	$q$ ( $m^3/s/m$ )	N.A.R. (m)	N.A.J. (m)	$h_s$ (m)	$h$ (m)	$C_s$ (-)	$G_0/h_s$ (-)	$S_{viga}$ (m)	(Tipo)
P 1.1	1,0	15,6	55,83	40,06	4,25	15,78	0,208	0,235	-	Tipo A
P 1.2	1,0	15,2	55,79	40,51	4,70	15,29	0,187	0,213	-	Tipo A
P 1.3	1,0	14,7	55,83	41,19	5,38	14,65	0,161	0,186	-	Tipo B
P 1.4	1,0	14,1	55,75	42,01	6,21	13,74	0,139	0,161	1,0	Tipo C
P 1.5	1,0	13,5	55,80	43,02	7,21	12,79	0,118	0,139	2,5	Tipo C
P 2.1	2,0	28,7	55,79	42,93	7,11	12,88	0,253	0,281	-	Tipo A
P 2.2	2,0	28,4	55,81	43,11	7,29	12,72	0,246	0,274	-	Tipo A
P 2.3	2,0	27,4	55,87	43,58	7,76	12,31	0,227	0,258	-	Tipo B
P 2.4	2,0	26,6	55,79	44,00	8,18	11,81	0,213	0,244	0,7	Tipo C
P 2.5	2,0	26,0	55,83	44,47	8,66	11,37	0,201	0,231	1,5	Tipo C
P 3.1	4,0	54,6	55,89	45,63	9,77	10,32	0,391	0,409	-	Tipo A
P 3.2	4,0	51,8	55,86	46,11	10,26	9,80	0,364	0,390	-	Tipo A
P 3.3	4,0	50,2	55,79	46,30	10,45	9,54	0,351	0,383	-	Tipo B
P 3.4	4,0	48,4	55,75	46,64	10,79	9,16	0,334	0,371	0,1	Tipo C
P 3.5	4,0	47,0	55,78	47,01	11,17	8,81	0,319	0,358	0,9	Tipo C
P 4.1	6,0	77,3	55,74	47,40	11,49	8,45	0,521	0,522	-	Tipo A0
P 4.2	6,0	72,3	55,73	48,01	12,1	7,83	0,481	0,496	-	Tipo A
P 4.3	6,0	68,3	55,70	48,48	12,6	7,30	0,453	0,476	-	Tipo B
P 4.4	6,0	65,2	55,77	48,99	13,12	6,85	0,429	0,457	0,3	Tipo C
P 4.5	6,0	61,6	55,76	49,53	13,67	6,29	0,406	0,439	0,5	Tipo C

Notas:

$G_0$ : Abertura da comporta;

$q$ : vazão específica;

N.A.R.: Nível de água do reservatório, medido a 90 m a montante da crista;

N.A.J.: Nível de água de jusante, medido a 330 m a jusante da crista;

$h_s$ : Diferença de elevação entre o nível de água no reservatório e a crista da soleira;

$h$ : Desnível entre o nível de água no reservatório e o nível de água de jusante;

$C_s$ : Coeficiente de descarga afogado;

$S_{viga}$ : Submergência da viga.

Ao analisar os resultados dos ensaios iniciais, verificou-se alguns registros incoerentes. Conforme detalhado no Capítulo 4, foram tomados cuidados adicionais com a vedação do tubo de escorva, levando a uma redução significativa na variação da calibragem. Dessa forma, definiu-se pela realização de 4 ensaios com aberturas parciais das comportas de 4,0 e 6,0 m, condições em que haviam sido medidos os maiores esforços, tendo sido denominados “Ensaio Finais”. Cada ensaio foi repetido quatro vezes a fim de analisar a repetibilidade das pressões registradas e identificar eventuais valores de imprecisão toleráveis.

### 3.3.2 Análise dos dados

Os resultados de cada um dos sensores foram estatisticamente analisados quanto a média, máxima, mínima e desvio padrão, bem como à coerência quanto ao resultado apresentado.

### 3.3.3 Transformação em esforços

Para transformação das pressões medidas em esforços na viga, foram calculadas as pressões resultantes em cada ponto de medição, pela diferença da pressão medida entre o ponto superior e o correspondente ponto inferior. A pressão resultante foi então multiplicada pela área de influência para transformação da pressão (m.c.a.) em força (N), através da fórmula:

$$F_a = p_{a \text{ resultante}} \cdot A_a \cdot \gamma$$

Onde:

$F_a$  [N] = Força no ponto  $a$

$p_{a \text{ resultante}}$  [m.c.a.] = pressão resultante no ponto  $a$

$A_a$  [m<sup>2</sup>] = área de influência do sensor na posição  $a$

$\gamma$  [N.m<sup>-3</sup>] = peso específico da água (9.810 N/m<sup>3</sup>)

As áreas de influência e as correspondências de sensores de face superior e inferior estão apresentadas na FIGURA 27 e TABELA 6.

FIGURA 27 – ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS SENSORES S03 E S11

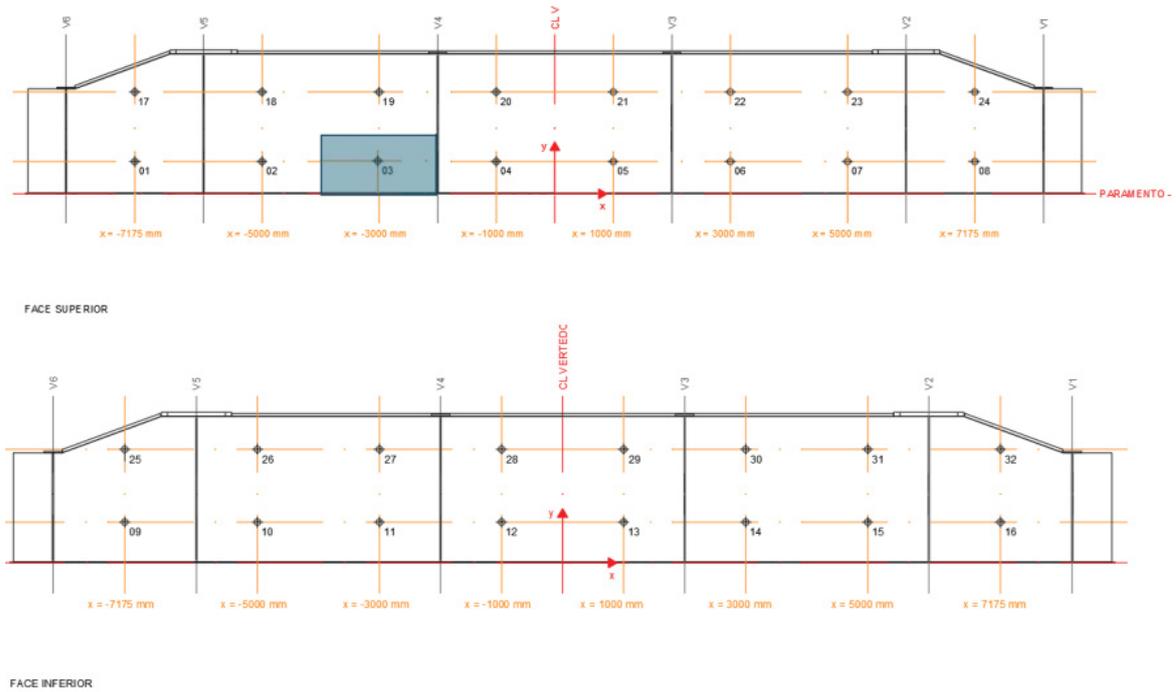


TABELA 6 – RELAÇÃO DAS TOMADAS DE PRESSÃO DA FACE SUPERIOR E INFERIOR

Tomada de pressão da face superior	Tomada de pressão da face inferior	Área de influência (m <sup>2</sup> )
S01	S09	2,79
S02	S10	2,38
S03	S11	2,38
S04	S12	2,38
S05	S13	2,38
S06	S14	2,38
S07	S15	2,38
S08	S16	2,79
S17	S25	2,22
S18	S26	2,38
S19	S27	2,38
S20	S28	2,38
S21	S29	2,38
S22	S30	2,38
S23	S31	2,38
S24	S32	2,22

## 4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios estão agregados nos Apêndices, de 1 a 5, sendo eles, as imagens das condições hidráulicas dos ensaios, níveis de água de jusante, pressões na soleira do vertedouro, as pressões na viga inferior da comporta e esforços resultantes.

### 4.1 ENSAIOS INICIAIS

Com base nos resultados dos ensaios preliminares, realizados conforme descrito no item 3.3, foram escolhidos oito ensaios - dois níveis de jusante, com condição de afogamento da viga totalmente (Tipo C) ou parcialmente (Tipo B) afogada, para cada abertura de comporta. As condições hidráulicas dos ensaios iniciais são apresentadas na TABELA 7.

TABELA 7 – CONDIÇÕES HIDRÁULICAS - ENSAIOS INICIAIS

Ensaio	$G_0$ (m)	$q$ ( $m^3/s/m$ )	N.A.R. (m)	N.A.J. (m)	$h_s$ (m)	$h$ (m)	$C_s$ (-)	$G_0/h_s$ (-)	$S_{viga}$ (m)	Tipo
1.1	1,0	14,7	55,83	41,19	5,38	14,65	0,161	0,186	-	Tipo B
1.2	1,0	14,1	55,75	42,01	6,21	13,74	0,139	0,161	1,0	Tipo C
2.1	2,0	27,4	55,87	43,58	7,76	12,31	0,227	0,258	-	Tipo B
2.2	2,0	26,6	55,79	44,00	8,18	11,81	0,213	0,244	0,7	Tipo C
3.1	4,0	50,2	55,79	46,30	10,45	9,54	0,351	0,383	-	Tipo B
3.2	4,0	47,0	55,78	47,01	11,17	8,81	0,319	0,358	0,9	Tipo C
4.1	6,0	68,3	55,70	48,48	12,6	7,30	0,453	0,476	-	Tipo B
4.2	6,0	65,2	55,77	48,99	13,12	6,85	0,429	0,457	0,3	Tipo C

Notas:

$G_0$ : Abertura da comporta;

$q$ : vazão específica;

N.A.R.: Nível de água do reservatório, medido a 90 m a montante da crista;

N.A.J.: Nível de água de jusante, medido a 330 m a jusante da crista;

$h_s$ : Diferença de elevação entre o nível de água no reservatório e a crista da soleira;

$h$ : Desnível entre o nível de água no reservatório e o nível de água de jusante;

$C_s$ : Coeficiente de descarga afogado;

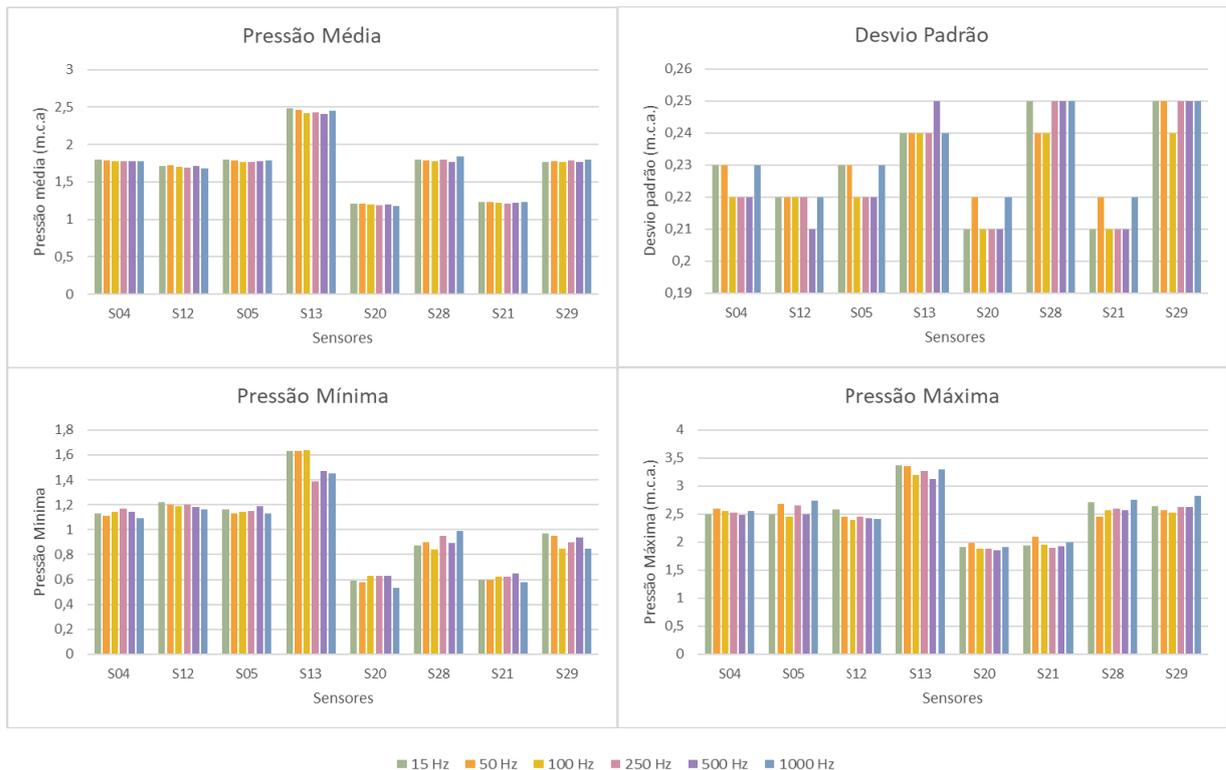
$S_{viga}$ : Submersão da viga.

Os dados das medições de pressão instantânea na viga inferior da comporta estão apresentados no Apêndice 4.

Foram calculados os dados de média, máximo, mínimo, desvio padrão, e plotadas as séries temporais de cada ensaio. As aquisições foram realizadas em seis frequências diferentes, e não apresentaram grandes variações nesses parâmetros. As



## ENSAIO INICIAL 2.2

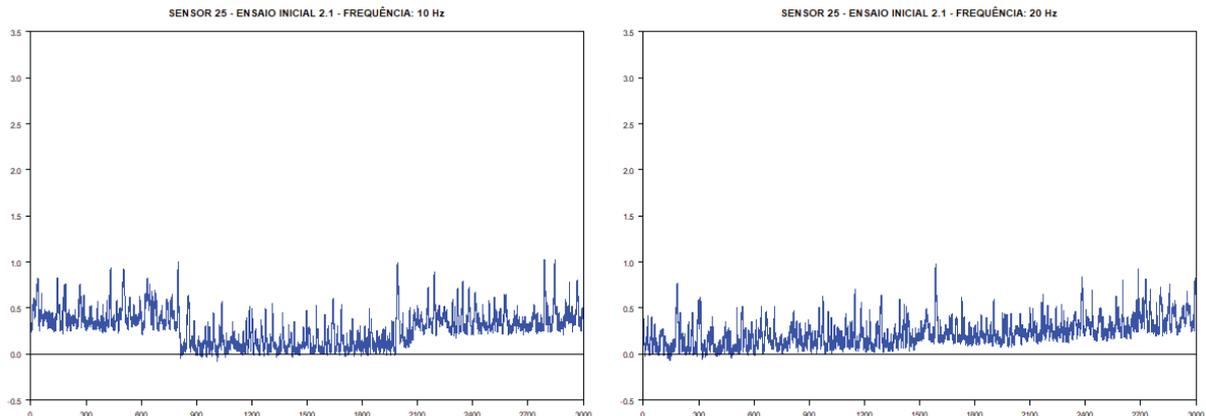


As análises das pressões médias dos ensaios iniciais indicaram que as pressões são mais altas na região central da viga, conforme esperado, considerando o que pôde ser observado durante os ensaios, que o impacto do ressalto é mais intenso nesse trecho. Verificou-se também, que os sensores de montante, mais próximos ao paramento da viga, apresentaram pressões mais altas do que a jusante.

Ao analisar as séries temporais, no entanto, percebeu-se a ausência de registro de pressões nulas nos ensaios com condições de afogamento intermitente, além de mudanças graduais ou repentinas no valor da tensão, de maneira aleatória.

A FIGURA 29 representa o registro de algumas das inconsistências observadas nos ensaios iniciais.

FIGURA 29 – INCOERÊNCIAS OBSERVADAS NAS SÉRIES TEMPORAIS DE PRESSÕES MÉDIAS



Inicialmente, imaginou-se que a modificação súbita dos meios gás e líquido durante o impacto intermitente das ondas seria responsável por inserir bolhas de ar no sistema de medição, o que levaria a uma alteração na calibragem dos instrumentos.

Diante disso, para verificação dessa suposição, foram repetidos os ensaios iniciais com afogamento intermitente da viga horizontal, sendo realizadas calibrações antes e após a execução do ensaio. No entanto, essa hipótese foi refutada, pois a comparação entre as calibrações inicial e final apresentou variações tanto para os transdutores da face superior quanto para os da face inferior da viga, indicando que esse efeito não ocorreu em função da alteração repentina dos meios gás e líquido, visto que a face superior não esteve sujeita aos impactos diretos das ondas de resalto hidráulico.

Outra suposição seria de que a vedação ao longo do sistema de medição de pressão estaria modificando a calibragem dos transdutores. O único ponto sujeito à entrada e saída de ar seria o tubo de escorva, que foi selado com silicone de vedação para uma nova rodada de ensaios. A variação da calibragem reduziu de forma significativa, de maneira a possibilitar a continuidade dos ensaios. Foram então definidas quatro condições para os novos ensaios, denominados “Ensaio Finais”.

## 4.2 ENSAIOS FINAIS

Após a revisão das condições de preparação dos ensaios, especificamente no processo de escorva, foram definidos quatro “Ensaio Finais” para a avaliação do

esforço na viga inferior da comporta. As condições hidráulicas desses ensaios estão apresentadas na TABELA 8.

TABELA 8 – ENSAIOS FINAIS

Ensaio	$G_0$ (m)	$q$ ( $m^3/s/m$ )	N.A.R. (m)	N.A.J. (m)	$h_s$ (m)	$h$ (m)	$C_s$ (-)	$G_0/h_s$ (-)	$S_{viga}$ (m)	$S_{viga}$ (Tipo)
3.3	4,0	50,5	55,81	46,30	10,50	9,51	0,352	0,383	-	Tipo B
3.6	4,0	45,7	55,80	47,40	11,60	8,40	0,307	0,345	1,9	Tipo C
4.2	6,0	72,9	55,70	48,05	12,25	7,65	0,486	0,490	-	Tipo B
4.5	6,0	61,2	55,73	49,55	13,75	6,18	0,404	0,436	2,1	Tipo C

Notas:

$G_0$ : Abertura da comporta;

$q$ : vazão específica;

N.A.R.: Nível de água do reservatório, medido a 90 m a montante da crista;

N.A.J.: Nível de água de jusante, medido a 330 m a jusante da crista;

$h_s$ : Diferença de elevação entre o nível de água no reservatório e a crista da soleira;

$h$ : Desnível entre o nível de água no reservatório e o nível de água de jusante;

$C_s$ : Coeficiente de descarga afogado;

$S_{viga}$ : Submergência da viga.

Para aumentar a confiabilidade nos resultados, cada ensaio foi repetido quatro vezes. As medições se mostraram semelhantes, e, para efeitos de análise do resultado, foi escolhido o ensaio que apresentou as menores diferenças entre as variações de calibragem inicial e final, tendo sido analisadas também a coerência com os resultados dos demais ensaios, comparação dos valores com os sensores adjacentes, variação de sinal e a coerência com as condições hidráulicas.

Durante os ensaios, observou-se que sobre a viga horizontal ficava um acúmulo de água, sendo perturbado pelo ressalto quanto este ultrapassava a altura da viga. As medidas na face superior apresentaram-se coerentes com essa condição, apresentando valores constantes referentes a essa coluna de água acumulada e pequenos valores para o desvio padrão.

Essa condição pode ser observada nos resultados das medições nos ensaios 3.3 e 4.2. Para o ensaio 3.3, esse acúmulo foi claro, e as pressões na face superior são praticamente constantes. No ensaio 4.2 no entanto, alguns vazamentos foram verificados refletindo na diferença das pressões.

As maiores pressões médias, assim como o desvio padrão, foram medidos no trecho central da viga, conforme esperado, pelo maior impacto do ressalto nessa região. As pressões máximas e mínimas foram verificadas com a viga em condição completamente afogada, ensaios finais 3.6 e 4.5. Os resultados das medições de pressão podem ser observados nas FIGURA 29 a FIGURA 32.

FIGURA 30 – ENSAIOS FINAIS – PRESSÃO MÉDIA

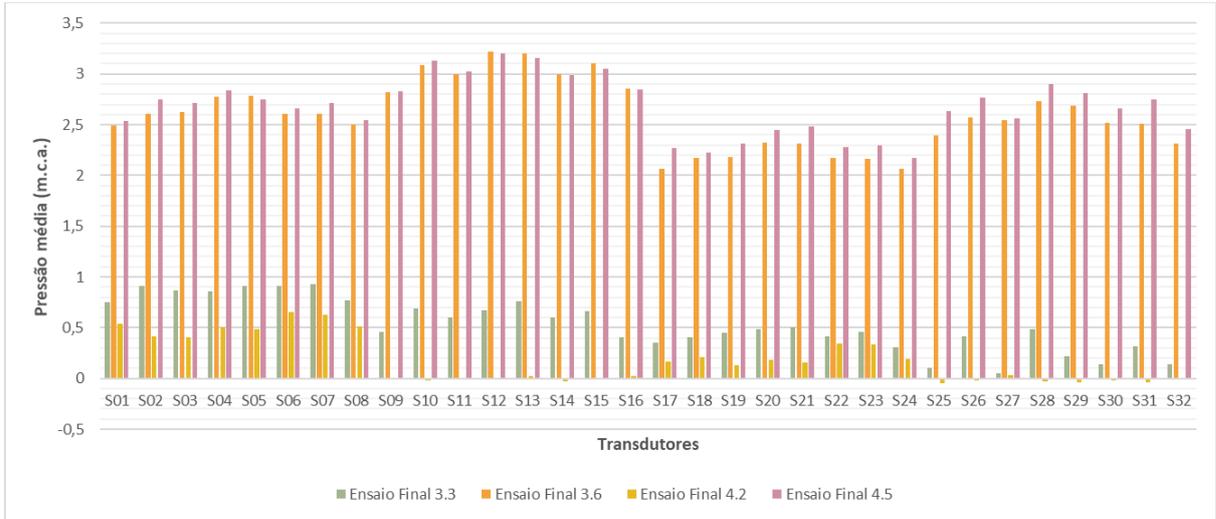


FIGURA 31 – ENSAIOS FINAIS – DESVIO PADRÃO

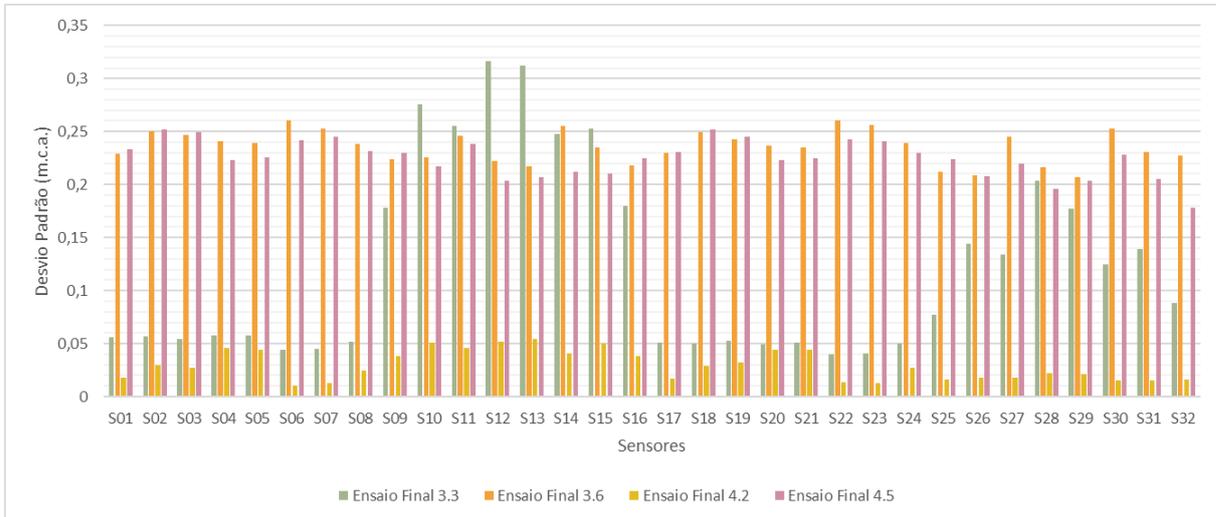


FIGURA 32 – ENSAIOS FINAIS – PRESSÃO MÍNIMA

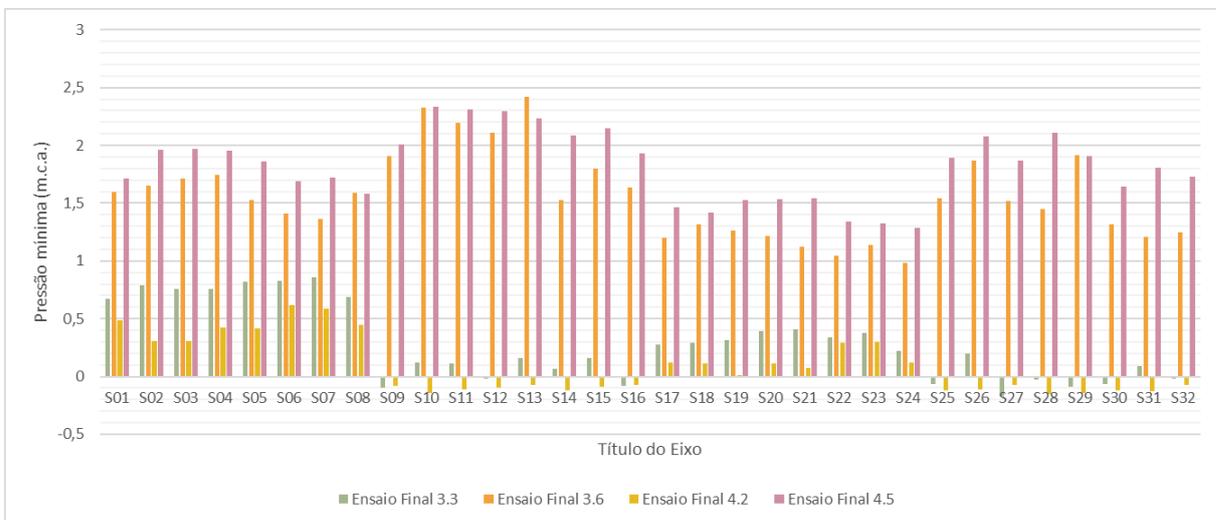
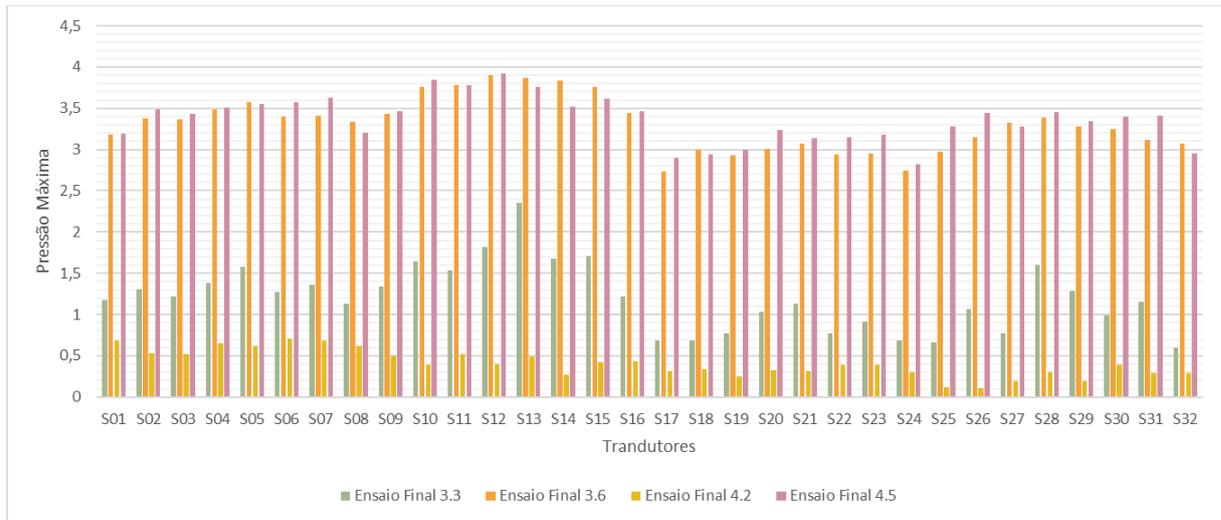


FIGURA 33 – ENSAIOS FINAIS – PRESSÃO MÁXIMA



As pressões foram transformadas em esforços, conforme explicado no item 3.3.3. Considerando como referência o sistema de pistão da comporta, quando as pressões na face superior resultaram maiores que as pressões na viga inferior, o esforço resultante foi positivo, correspondente a uma força de tração, em que a força empurra a viga horizontal pra baixo, enquanto na situação contrária, o esforço resultante foi negativo, correspondente a uma força de compressão, em que a força empurra a viga horizontal para cima.

Para os esforços com a viga afogada de maneira intermitente, ensaios finais 3.3 e 4.2, 88% e 99,9% dos esforços resultantes de cada par de sensor foram de tração, respectivamente. Esse resultado se mostra coerente com o observado nos ensaios, e se explica devido acúmulo de água sobre a viga horizontal. Isso se deve ao fato da viga da comporta ter sido construída de maneira única, diretamente presa ao paramento e às vigas verticais, sem espaço para o escoamento desse volume. As pressões devido ao impacto do ressalto na face inferior da viga, não foram suficientes para compensar a pressão na face superior. No entanto, essa situação tem influência no resultado do esforço, de maneira a majorar os esforços de tração, e minorar os de compressão.

Nos ensaios com a viga completamente afogada, ensaios finais 3.6 e 4.5, a viga recebe impactos em ambas as faces. As medições dos esforços, entretanto, resultaram quase que totalmente em esforços de compressão somente.

FIGURA 34 – ENSAIOS FINAIS – ESFORÇOS MÉDIOS

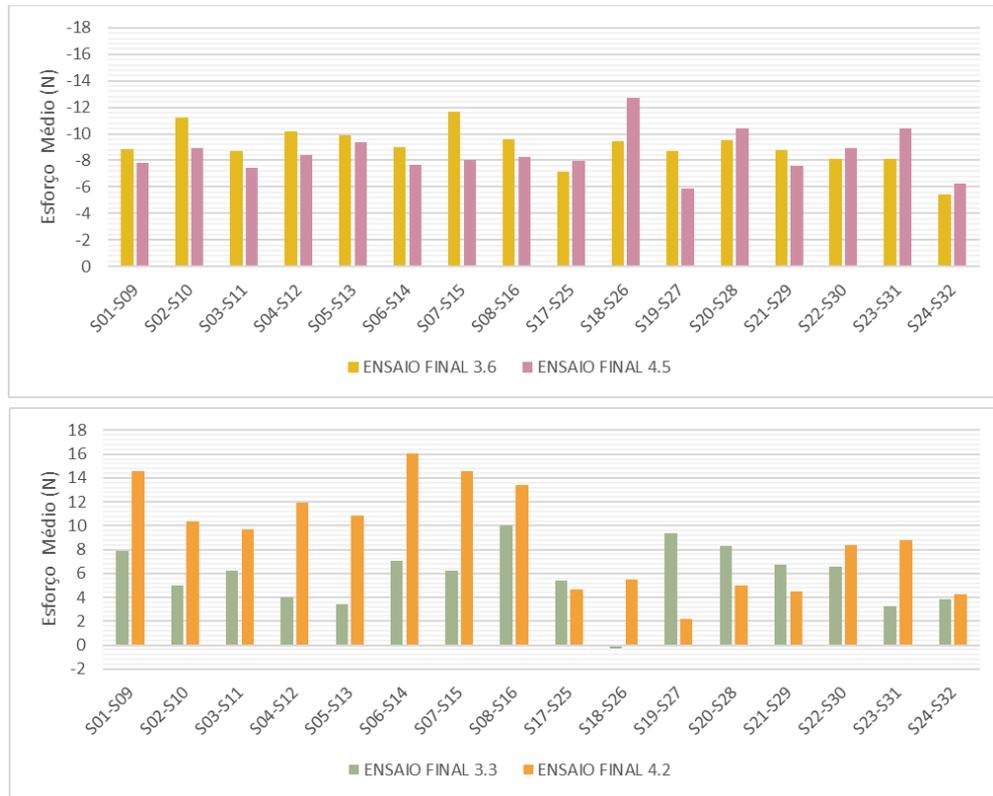
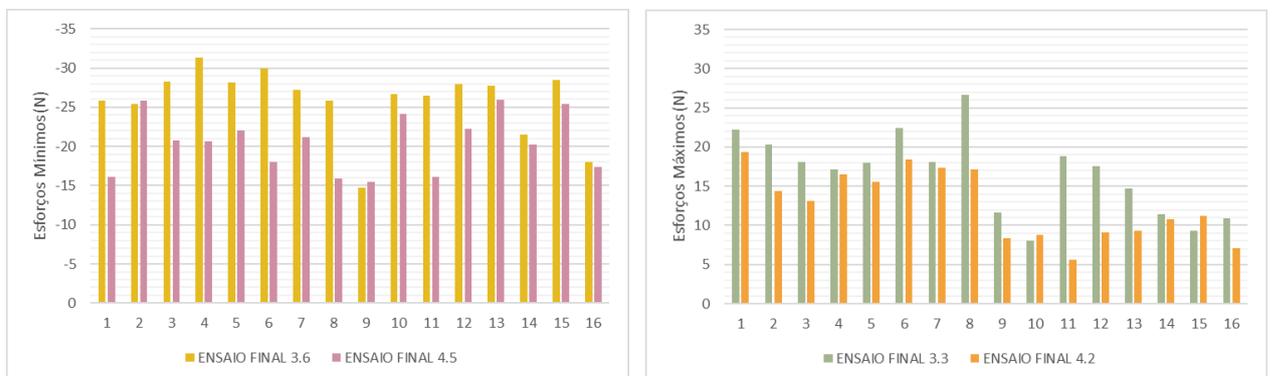


FIGURA 35 – ENSAIOS FINAIS – ESFORÇOS MÍNIMOS E MÁXIMOS POR PAR DE SENSOR

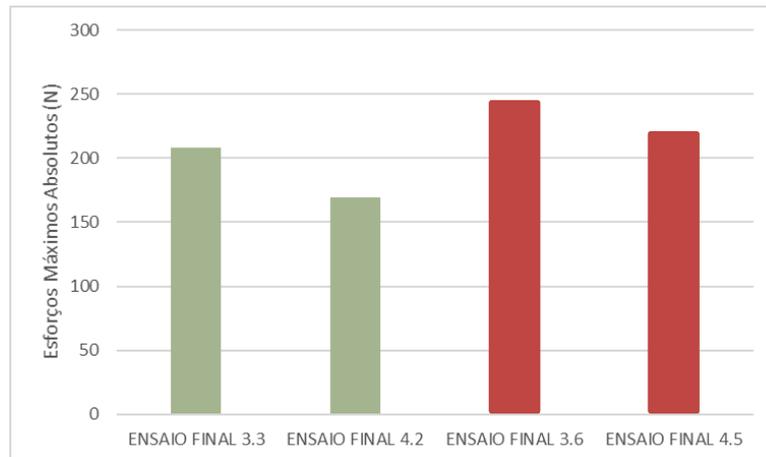


Considerando o esforço total atuante na viga como a somatória dos esforços calculados em cada região de influência definida por cada par de sensor, verifica-se que os esforços máximos de compressão com a condição de afogamento total da viga são da mesma ordem de grandeza que os esforços máximos de tração para os esforços na condição parcialmente afogada, variando de -244 a 208 N nos ensaios 3.6 e 3.3, respectivamente. Em ambos os casos, as condições com abertura de 4,0 m apresentaram esforços superiores aos com abertura de 6,0 m. Para os ensaios 4.2 e

4.5 os esforços máximos resultantes foram de 169 e -219 N, na mesma ordem dos testes.

As variações dos esforços, tanto quando se analisa a média, quanto os máximos, são maiores nos ensaios com a viga totalmente afogada.

FIGURA 36 – ENSAIOS FINAIS – ESFORÇOS MÁXIMOS ABSOLUTOS



Considerando os esforços resultantes, tanto de compressão quanto de tração, da ordem de 250 N no modelo, tem-se o correspondente a 3.900 kN em protótipo. Sendo o peso da comporta estimado em cerca de 2.138 tf, ou 20.973 N, esse esforço equivale a 19% do peso dessa estrutura.

Não foram observadas relações entre as pressões na soleira ou os níveis de água de jusante com os esforços calculados.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho avaliou-se os esforços decorrentes do impacto do ressalto hidráulico na viga inferior de comportas em vertedouros de baixa queda, com graus de afogamento total ou intermitente, através de ensaios em modelo hidráulico reduzido e medições por transdutores de pressão.

O uso de transmissores de pressão para determinação dos esforços na viga inferior da comporta apresentou inúmeros desafios, desde as definições para a instalação dos equipamentos, até as incertezas consequentes da alteração repentina dos meios gás e líquido devido ao impacto intermitente das ondas do ressalto hidráulico. A análise da variação inicial e final da calibragem nos ensaios iniciais tanto nos sensores da face superior, que não estavam sujeitas a esse impacto intermitente, quanto da face inferior, indicou que essa questão não influenciou no resultado das medições. Percebeu-se, no entanto, que os cuidados com a vedação ao longo do sistema de medição são imprescindíveis para que não haja nenhum tipo de interferência nas aquisições. Somente após a selagem do tubo de escorva que as variações na calibragem diminuíram significativamente.

A maneira como a viga foi projetada e construída também influenciou nos esforços resultantes, visto que, sendo a viga uma estrutura única diretamente presa ao paramento, não havia espaço para um possível esvaziamento, ocasionando em um acúmulo de água na face superior da viga.

Ainda, para os ensaios com a viga totalmente afogada, os resultados obtidos foram diferentes do esperado de acordo com as condições hidráulicas do escoamento. Mesmo recebendo impactos em ambas as faces, os esforços resultantes foram apenas de compressão, sugerindo que a determinação desses esforços sobre a viga envolve outros parâmetros além da pressão. Assim sendo, a utilização dos transdutores de pressão pode não ser a metodologia mais indicada para essa pesquisa.

Os esforços resultantes foram da ordem de  $\pm 250$  N no modelo, o que corresponde a esforços da ordem de 3.900 kN em protótipo, equivalente a cerca de 19% do peso total da comporta. Apesar das questões acima mencionadas, esse valor é próximo ao encontrado nos estudos de Nardy, Pedrazzi e Maia (2014).

Sugere-se a continuidade dos estudos com a utilização de diferentes técnicas de medição, tais como células de carga e sensores de pressões táteis, e a análise da

influência desses esforços de maneira estática e dinâmica, considerando a frequência de vibração, no dimensionamento estrutural da comporta.

## REFERÊNCIAS

- ABACUS, A. **Pressure Sensors: The Design Engineer's Guide MEMS Pressure Sensors**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 97.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7529: Comportas Hidráulicas - Terminologia**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 8883: Cálculo e Fabricação de Comportas Hidráulicas**. Rio de Janeiro, 2002.
- ALVES, A. A. M. **Caracterização das Solicitações em Bacias de Dissipação por Ressalto Hidráulico com Baixo Número de Froude**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, 2008.
- BÉLANGER, J. B. **Essai sur la Solution Numérique de Quelques Problèmes Relatifs au Mouvement Permanent des Eaux Courantes**. Paris: Chez Carilian-Goeury, 1828.
- DANIEL, R. A.; PAULUS, T. **Lock Gates and Other Closures in Hydraulic Projects**. Elsevier – Butterworth-Heinemann. Oxford – Cambridge, 2019.
- ELEVATORSKI, E. A. **Hydraulic Energy Dissipators**. New York: MacGraw-Hill, 1959.
- ERBISTI, P. C. F. **Comportas Hidráulicas**. 2 ed. Editora Interciência, 2002.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 5 ed. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2001. p. 520.
- FREITAS, G.H.S.; MICHELS, F.S.; PASSOS, W. E. **Análise adimensional e aplicação hidráulica do teorema Pi de Buckingham**. *Vetor*, v. 25, n. 2, 2015. p. 84 – 101
- GASSMANN, E.; GRIES, A. **Electronic pressure measurement**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 74.
- KISTLER. **Test & Measurement Pressure**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 63.
- JAN HJELMGREN. **Dynamic Measurement of Pressure - A Literature Survey**. [S.l.]: SP Technical Research Institute of Sweden Dynamic, 2002. p. 1–64.
- LEWIN, J. **Hydraulic Gates and Valves: In Free Surface Flow and Submerged Outlets**. Second, London: Thomas Telford Publishing, 2001. p. 300.
- MARQUES, M.; DRAPEAU, J.; VERRETE, J. L. **Flutuação de pressão em um ressalto hidráulico**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 2, p. 45-52, 1997.

MARQUES, M. G.; ALMEIDA, F. M.; ENDRES, L. A. M. **Adimensionalização de pressões médias em bacias de dissipação por ressalto hidráulico**. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13., 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1999.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2050**. Brasília, MME/EPE, 2020.

NARDY, C. F.; PEDRAZZI, J. A.; MAIA, M. R. S. **Spillway - Downstream Hydraulic Effects in Radial Gates**, [S.l.: s.n.], 2014. p. 10.

NAUDASCHER, E. **Hydrodynamic Forces**. Rotterdam: A.A. Balkema Publishers, 1991. p. 294.

NOVAK, G.; MLANCNIK, J.; BOMBAC, M.; VOSNJAK, S. **Hydrodynamic forces during the operation of a model radial gate**. Journal of Applied Water Engineering and Research, v.5, n. 1, p. 70-77, 2017.

PETERKA, A. J. **Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators**. [S.l.:s.n.], 1963.

POVH, P. H.; ARAUJO FILHO; VANZ A. L. **Simulação Numérica do Vertedouro da UHE Santo Antônio**. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 29, 2013. Porto de Galinhas. Anais.. Porto de Galinhas: CBDB, 2013. CD-ROOM.

RAJARATNAM, N. **Hydraulic jump as a wall jet**. Journal of Hydraulic Division, v.91, p. 107-132, 1965.

TEIXEIRA, E. D.; DAI PRÁ, M.; WIEST, R. A.; MARQUES, M. G. **Efeito de escala nos valores de pressão média junto ao fundo em bacias de dissipação por ressalto hidráulico submerso**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 2, p. 87-100, 2012.

USACE (UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS) **Design of Spillway Tainter Gates**. EM 110-2-2, Washington, DC, 2000. p. 1-113

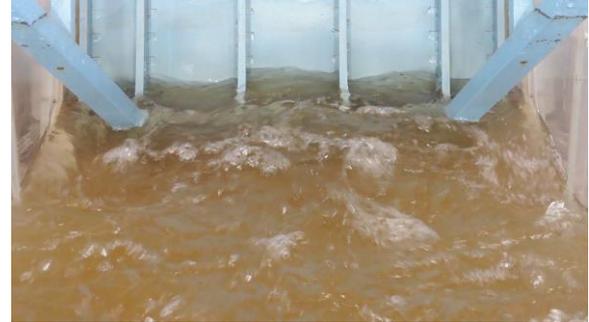
WHITE, F. M. **Mecânica dos Fluidos**. 6. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.

## APÊNDICE 1 – CONDIÇÕES GERAIS DO ESCOAMENTO

FIGURA 37 – ENSAIOS INICIAIS – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO JUNTO À VIGA HORIZONTAL INFERIOR DA COMPORTA



(a) Ensaio 1.1 –  $G_0 = 1,0$  m



(b) Ensaio 1.2 –  $G_0 = 1,0$  m



(c) Ensaio 2.1 –  $G_0 = 2,0$  m



(d) Ensaio 2.2 –  $G_0 = 2,0$  m



(e) Ensaio 3.1 –  $G_0 = 4,0$  m



(f) Ensaio 4.2 –  $G_0 = 4,0$  m



(g) Ensaio 4.1 –  $G_0 = 6,0$  m



(b) Ensaio 4.2 –  $G_0 = 6,0$  m

FIGURA 38 – ENSAIOS FINAIS – CONDIÇÕES DE ESCOAMENTO JUNTO À VIGA HORIZONTAL INFERIOR DA COMPORTA



(a) Ensaio 3.3 – vistas frontal e lateral



(b) Ensaio 3.6 – vistas frontal e lateral



(c) Ensaio 4.2 – vista frontal e lateral



(d) Ensaio 4.5 – vista frontal e lateral

## APÊNDICE 2 – NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE

TABELA 9 – NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 1.1 e 1.2

Ensaio		1.1		1.2	
Posição	Abcissa	Mínimo/Máximo	Médio	Mínimo/Máximo	Médio
S01	6,5	38,25/39,53	38,89	39,49/40,62	40,06
S02	11,5	37,23/39,23	38,23	38,54/40,46	39,50
S03	16,5	36,89/39,34	38,11	38,51/40,52	39,52
S04	21,5	36,96/39,46	38,22	38,43/40,72	39,58
S05	26,5	37,62/39,90	38,75	38,60/40,72	39,65
S06	31,5	38,37/40,50	39,43	39,10/41,12	40,10
S07	36,5	39,05/40,98	40,01	39,56/41,63	40,59
S08	41,5	39,45/41,39	40,41	39,96/41,97	40,96
S09	46,5	39,79/41,58	40,68	40,34/42,25	41,29
S10	51,5	40,07/41,72	40,90	40,68/42,36	41,52
S11	56,5	40,30/41,70	41,00	40,94/42,43	41,68
S12	61,5	40,43/41,67	41,05	41,12/42,40	41,75
S13	68,2	40,60/41,67	41,13	41,28/42,42	41,85
S14	73,2	40,61/41,61	41,11	41,32/42,33	41,83
S15	80,5	40,63/41,55	41,09	41,37/42,33	41,85
S16	85,5	40,61/41,51	41,07	41,37/42,27	41,82

TABELA 10 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 2.1 e 2.2

Ensaio		2.1		2.2	
Posição	Abcissa	Mínimo/Máximo	Médio	Mínimo/Máximo	Médio
S01	5,5	39,70/41,07	40,38	40,25/41,93	41,09
S02	10,5	38,25/40,97	39,61	39,17/41,58	40,37
S03	15,5	37,90/41,11	39,50	39,05/41,74	40,40
S04	20,5	37,94/41,30	39,59	38,82/42,04	40,42
S05	25,5	38,56/41,74	40,10	39,09/42,12	40,60
S06	30,5	39,10/42,37	40,72	39,54/42,73	41,11
S07	35,5	39,59/42,82	41,20	39,96/43,21	41,57
S08	40,5	40,05/43,36	41,70	40,44/43,63	42,03
S09	45,5	40,68/43,66	42,17	40,86/43,98	42,44
S10	50,5	41,14/44,00	42,56	41,46/44,29	42,87
S11	55,5	41,60/44,18	42,88	41,83/44,49	43,16
S12	60,5	41,98/44,26	43,14	42,28/44,59	43,43
S13	67,2	42,48/44,31	43,39	42,78/44,66	43,73
S14	72,2	42,66/44,23	43,45	42,99/44,60	43,79
S15	79,5	42,74/44,11	43,43	43,16/44,53	43,84
S16	84,5	42,77/44,04	43,41	43,19/44,41	43,80

TABELA 11 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 3.1 e 3.2

Ensaio		3.1		3.2	
Posição	Abcissa	Mínimo/Máximo	Médio	Mínimo/Máximo	Médio
S01	5,5	40,42/43,38	41,91	42,60/44,55	43,58
S02	10,5	39,48/43,29	41,37	41,64/44,41	43,02
S03	15,5	38,74/43,96	41,34	41,35/44,74	43,04
S04	20,5	39,00/44,62	41,77	41,08/45,16	43,10
S05	25,5	39,45/45,25	42,34	41,14/45,36	43,25
S06	30,5	40,07/45,75	42,87	41,20/45,91	43,55
S07	35,5	40,21/46,31	43,26	41,40/46,29	43,84
S08	40,5	41,05/46,41	43,70	41,59/46,65	44,14
S09	45,5	41,56/46,79	44,17	41,92/46,76	44,37
S10	50,5	42,37/46,95	44,68	42,23/47,46	44,91
S11	55,5	43,07/47,19	45,13	43,46/47,27	45,37
S12	60,5	43,48/47,32	45,41	44,14/47,57	45,84
S13	67,2	44,29/47,40	45,85	44,81/47,84	46,32
S14	72,2	44,52/47,41	45,97	45,32/47,90	46,60
S15	79,5	44,92/47,32	46,14	45,54/47,89	46,71
S16	84,5	45,03/47,21	46,12	45,79/47,85	46,82

TABELA 12 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS INICIAIS 4.1 e 4.2

Ensaio		4.1		4.2	
Posição	Abcissa	Mínimo/Máximo	Médio	Mínimo/Máximo	Médio
S01	5,5	42,65/45,57	44,11	44,12/46,37	45,25
S02	10,5	41,77/45,76	43,76	43,31/46,41	44,86
S03	15,5	40,94/46,56	43,72	42,64/46,98	44,81
S04	20,5	40,63/47,62	44,10	42,29/47,66	44,94
S05	25,5	40,47/48,49	44,48	42,02/48,18	45,08
S06	30,5	41,30/48,92	45,11	42,47/48,66	45,51
S07	35,5	42,02/49,32	45,60	42,42/49,33	45,85
S08	40,5	42,21/49,61	45,91	42,90/49,37	46,11
S09	45,5	42,65/49,71	46,20	42,97/49,68	46,36
S10	50,5	43,50/49,75	46,63	43,80/49,58	46,73
S11	55,5	44,42/49,62	47,01	44,67/49,56	47,10
S12	60,5	45,00/49,66	47,34	45,52/49,62	47,57
S13	67,2	45,85/49,71	47,78	46,28/49,81	48,05
S14	72,2	46,21/49,78	47,99	46,63/49,97	48,29
S15	79,5	46,66/49,69	48,18	47,08/49,89	48,48
S16	84,5	46,87/49,59	48,24	47,23/49,93	48,58

FIGURA 39 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 1.1

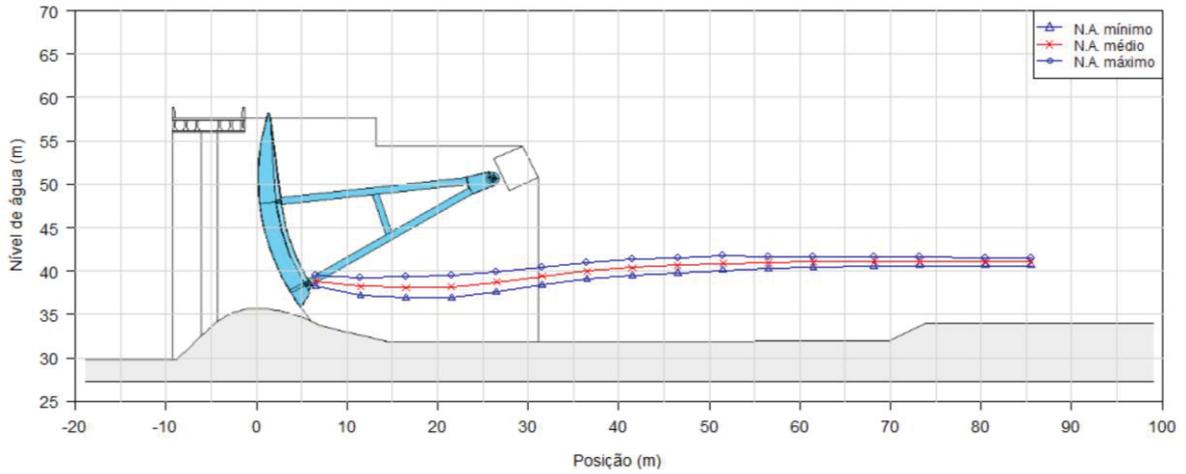


FIGURA 40 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 1.2

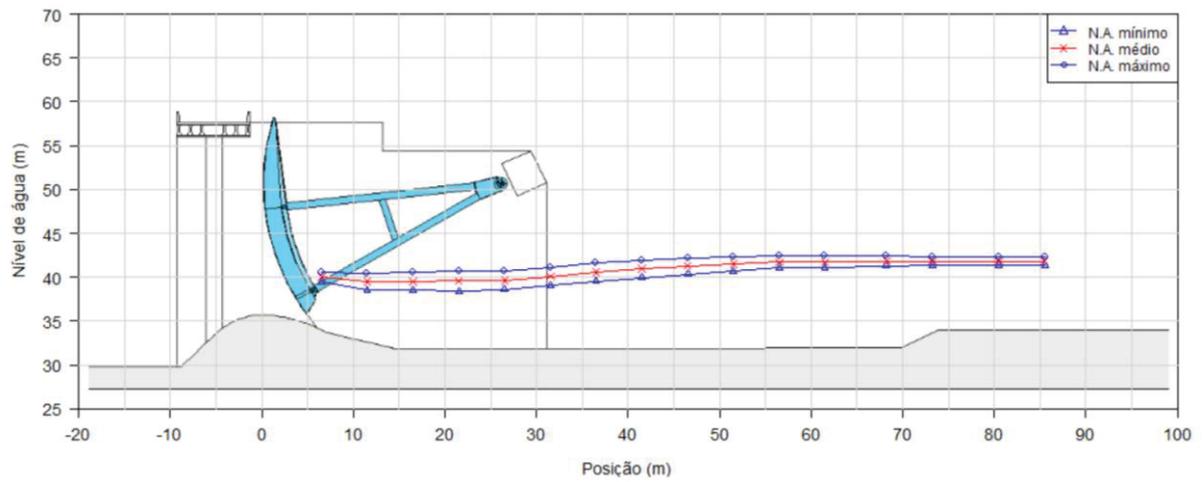


FIGURA 41 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 2.1

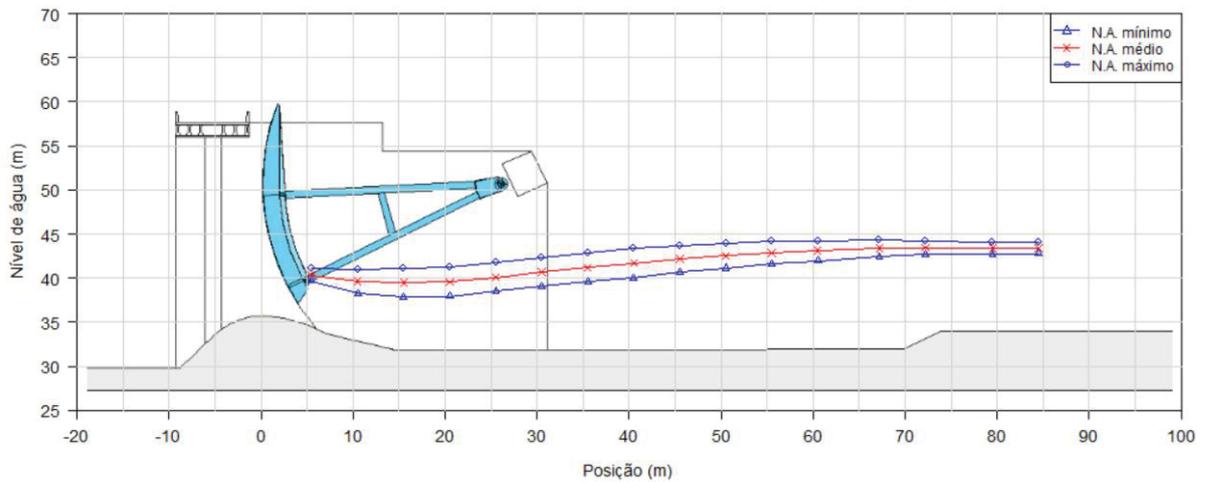


FIGURA 42 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 2.2

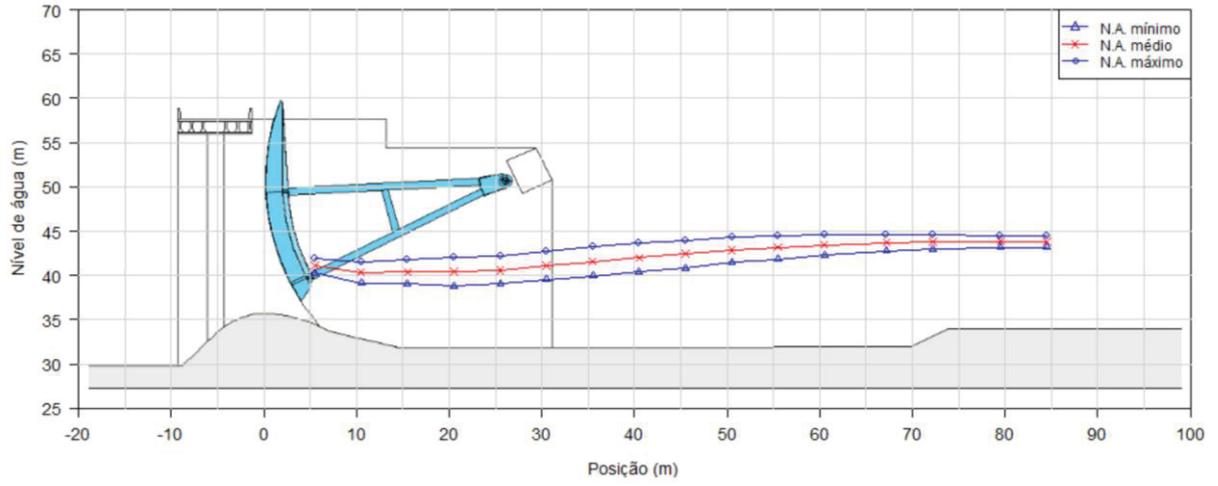


FIGURA 43 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 3.1

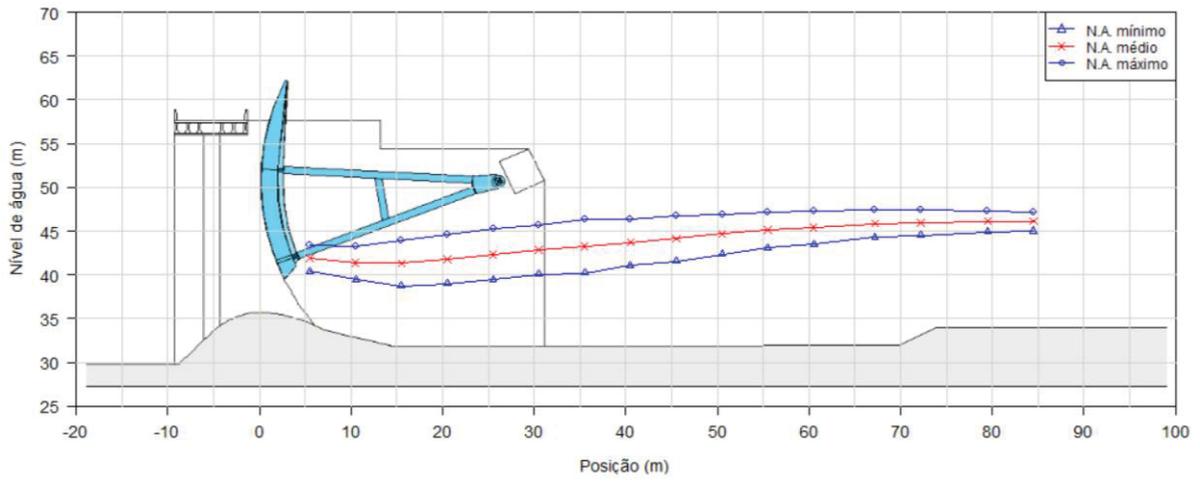


FIGURA 44 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 3.2

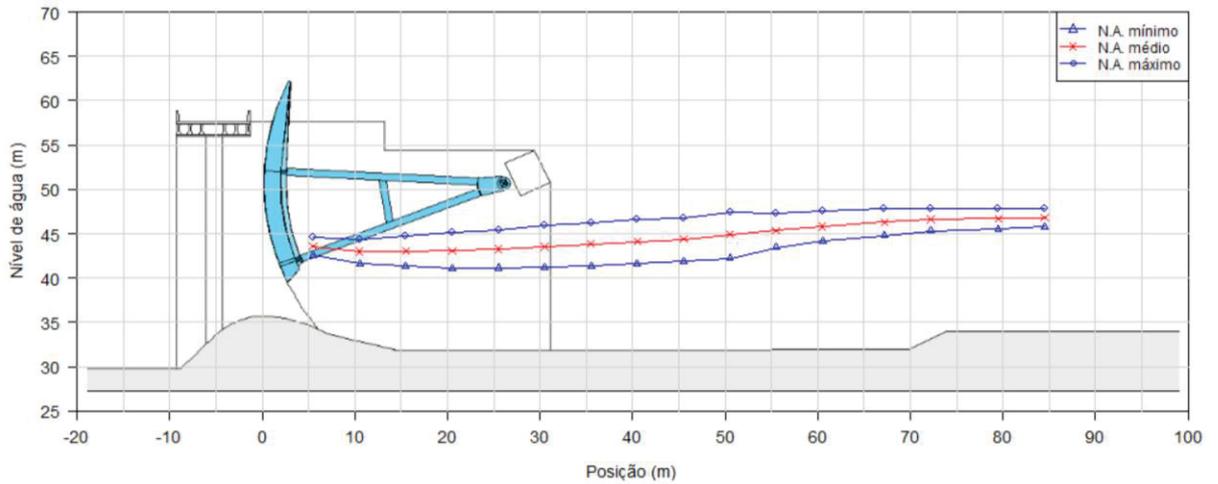


FIGURA 45 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 4.1

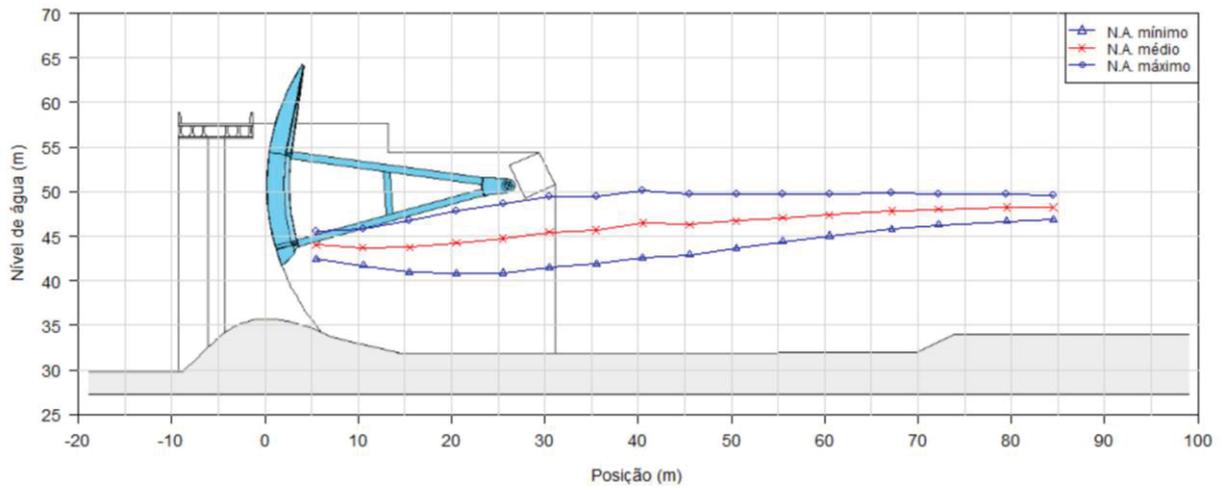


FIGURA 46 - PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO INICIAL 4.2

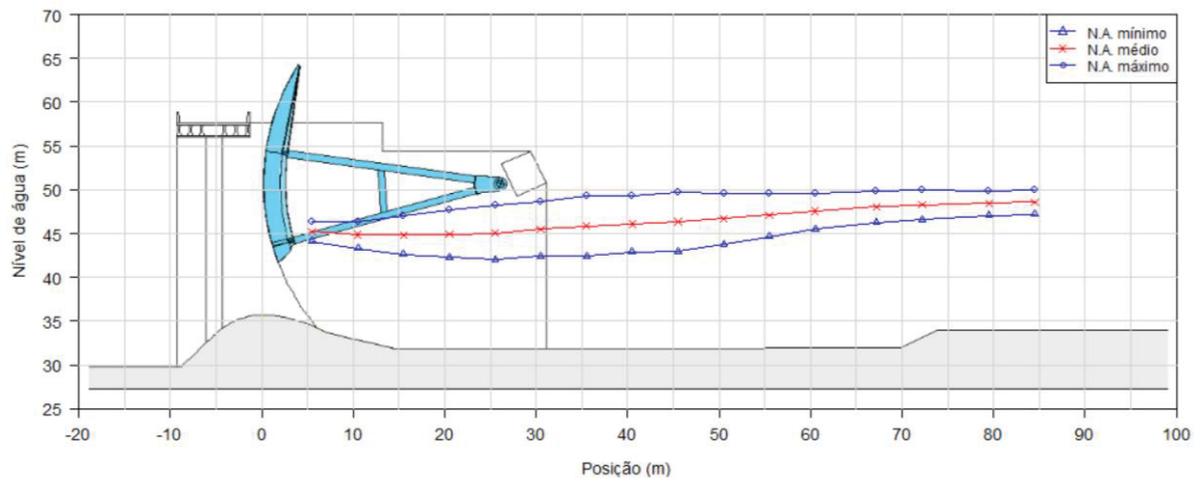


TABELA 13 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS FINAIS 3.3 E 3.6

Ensaio		3.3		3.6	
Posição	Abscissa <sup>(1)</sup>	Mín/Máx	Médio	Mín/Máx	Médio
S01	5,5	40,46 / 43,50	41,98	43,51 / 45,31	44,41
S02	10,5	39,60 / 43,35	41,46	42,64 / 45,26	43,95
S03	15,5	38,62 / 44,06	41,29	42,38 / 45,32	43,84
S04	20,5	38,93 / 44,61	41,74	42,02 / 45,77	43,89
S05	25,5	39,86 / 45,44	42,49	42,17 / 45,88	44,01
S06	30,5	39,96 / 46,64	43,06	42,17 / 46,32	44,25
S07	35,5	40,12 / 46,35	43,23	42,03 / 46,57	44,30
S08	40,5	40,77 / 46,48	43,61	42,22 / 46,77	44,48
S01	45,5	41,41 / 46,89	44,16	42,70 / 47,02	44,85
S10	50,5	42,25 / 46,95	44,61	43,17 / 47,36	45,26
S11	55,5	42,82 / 47,15	45,00	43,97 / 47,56	45,73
S12	60,5	43,51 / 47,22	45,36	44,50 / 47,79	46,11
S13	67,2	44,21 / 47,49	45,85	45,38 / 48,20	46,79
S14	72,2	44,60 / 47,40	45,99	45,61 / 48,32	46,97
S15	79,5	44,81 / 47,31	46,06	45,96 / 48,17	47,08
S16	84,5	45,01 / 47,17	46,10	46,14 / 48,17	47,16

TABELA 14 - NÍVEIS DE ÁGUA DE JUSANTE – ENSAIOS FINAIS 4.2 E 4.5

Ensaio		4.2		4.5	
Posição	Abscissa <sup>(1)</sup>	Mín/Máx	Médio	Mín/Máx	Médio
S01	5,5	40,92 / 44,68	42,79	45,71 / 47,62	46,66
S02	10,5	40,34 / 45,11	42,69	44,90 / 47,65	46,27
S03	15,5	39,61 / 46,14	42,85	44,38 / 48,06	46,21
S04	20,5	39,44 / 47,56	43,49	44,01 / 48,49	46,22
S05	25,5	40,92 / 48,33	44,43	43,89 / 49,01	46,43
S06	30,5	41,14 / 49,20	45,04	43,96 / 49,18	46,56
S07	35,5	41,67 / 48,91	45,25	43,80 / 49,69	46,69
S08	40,5	41,59 / 49,40	45,52	44,05 / 49,56	46,80
S01	45,5	42,81 / 49,28	46,00	44,45 / 49,76	47,10
S10	50,5	43,11 / 49,57	46,36	44,94 / 49,71	47,32
S11	55,5	42,40 / 50,21	46,79	45,49 / 49,94	47,69
S12	60,5	44,71 / 49,53	47,12	46,06 / 49,93	47,99
S13	67,2	45,49 / 49,53	47,51	46,88 / 50,25	48,57
S14	72,2	45,89 / 49,50	47,69	47,29 / 50,35	48,82
S15	79,5	46,22 / 49,32	47,77	47,79 / 50,49	49,13
S16	84,5	46,43 / 49,23	47,85	48,03 / 50,41	49,21

FIGURA 47 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 3.3

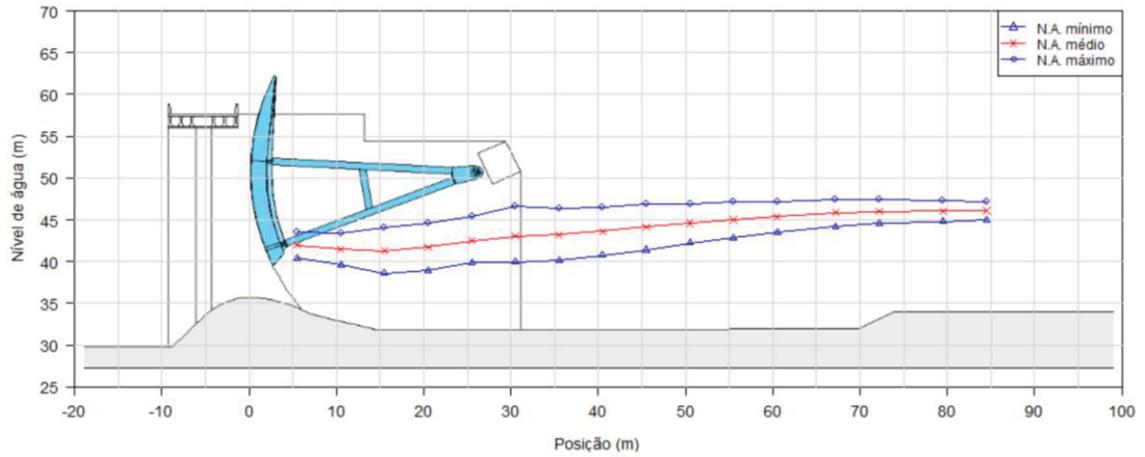


FIGURA 48 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 3.6

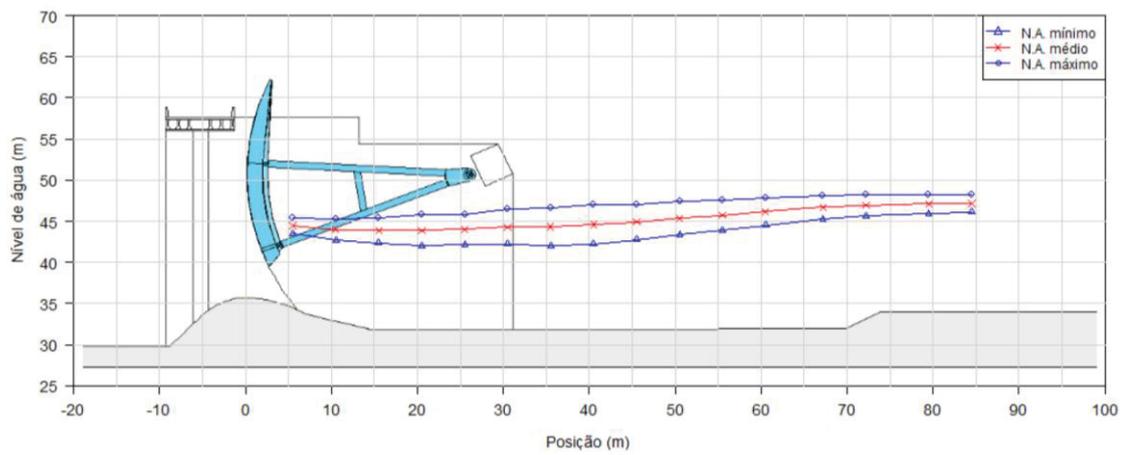


FIGURA 49 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 4.2

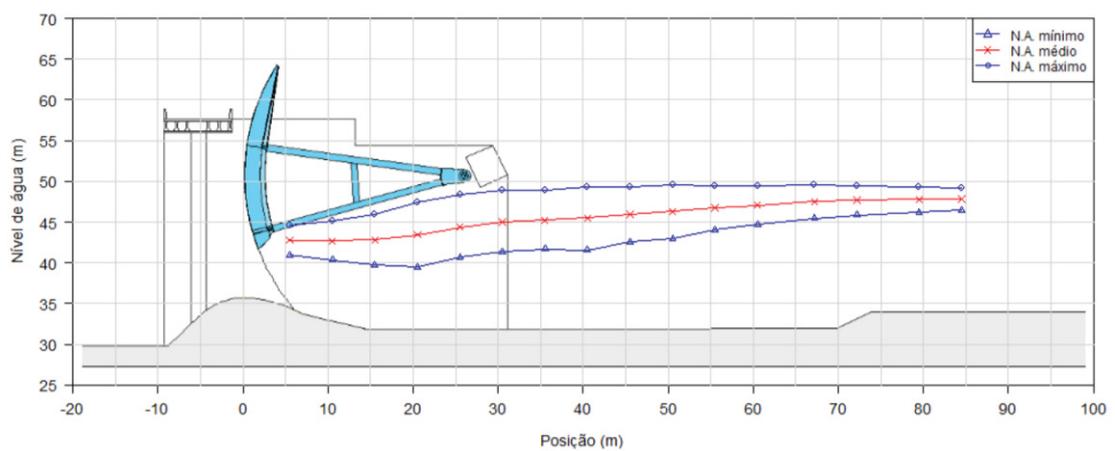
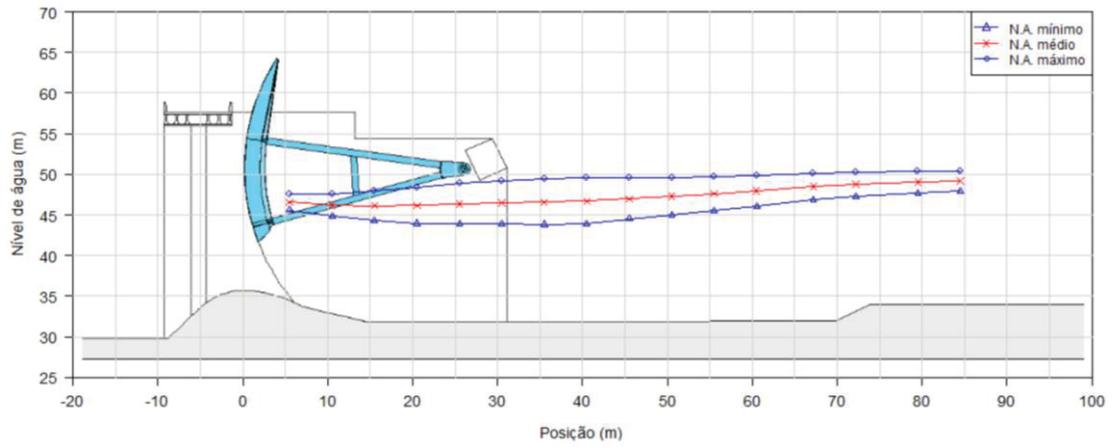


FIGURA 50 – PERFIL DE LINHA DE ÁGUA – ENSAIO FINAL 4.5



### APÊNDICE 3 – PRESSÕES MÉDIAS NA SOLEIRA DO VERTEDOIRO

TABELA 15 – PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOIRO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSAIOS 1.1 E 1.2

Posição		Identificação	Ensaio			
Abcissa (m)	Elevação (m)		1.1		1.2	
			Cota Piez (m)	Pressão (m)	Cota Piez (m)	Pressão (Tipo)
-8,74	30,09	P01	55,85	25,76	55,82	25,73
-6,97	31,87	P02	55,84	23,97	55,82	23,95
-5,28	33,55	P03	55,82	22,27	55,79	22,24
-4,08	34,56	P04	55,76	21,20	55,74	21,18
-2,81	35,24	P05	55,67	20,43	55,66	20,42
-1,43	35,66	P06	55,52	19,86	55,52	19,86
0,00	35,80	P07	55,24	19,44	55,25	19,45
1,04	35,73	P08	54,88	19,15	54,93	19,20
2,07	35,56	P09	54,20	18,64	54,29	18,73
3,08	35,32	P10	52,51	17,19	52,71	17,39
4,07	35,01	P11	47,89	12,88	48,43	13,42
4,70	34,78	P12	42,98	8,20	43,91	9,13
5,32	34,54	P13	39,68	5,14	40,85	6,31
5,93	34,27	P14	38,67	4,40	39,92	5,65
6,39	34,06	P15	39,94	5,88	40,82	6,76
6,84	33,84	P16	41,70	7,86	42,48	8,64
7,32	33,68	P17	42,20	8,52	43,23	9,55
8,63	33,36	P18	38,94	5,58	40,29	6,93
9,95	33,04	P19	38,69	5,65	39,94	6,90
11,26	32,71	P20	38,61	5,90	39,88	7,17
12,58	32,39	P21	38,53	6,14	39,86	7,47
13,90	32,07	P22	40,71	8,64	41,95	9,88
14,69	32,00	P23	39,97	7,97	41,25	9,25
17,19	32,00	P24	38,23	6,23	39,68	7,68
19,69	32,00	P25	38,20	6,20	39,68	7,68
22,19	32,00	P26	38,33	6,33	39,65	7,65
24,69	32,00	P27	38,58	6,58	39,73	7,73
27,19	32,00	P28	38,90	6,90	39,87	7,87
29,69	32,00	P29	39,18	7,18	40,00	8,00

TABELA 16 - PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 2.1 E 2.2

Posição		Identificação	Ensaio			
Abcissa (m)	Elevação (m)		2.1		2.2	
			Cota Piez (m)	Pressão (m)	Cota Piez (m)	Pressão (Tipo)
-8,74	30,09	P01	55,84	25,75	55,78	25,69
-6,97	31,87	P02	55,80	23,93	55,74	23,87
-5,28	33,55	P03	55,70	22,15	55,63	22,08
-4,08	34,56	P04	55,50	20,94	55,43	20,87
-2,81	35,24	P05	55,19	19,95	55,15	19,91
-1,43	35,66	P06	54,69	19,03	54,66	19,00
0,00	35,80	P07	53,74	17,94	53,75	17,95
1,04	35,73	P08	52,60	16,87	52,68	16,95
2,07	35,56	P09	50,55	14,99	50,77	15,21
3,08	35,32	P10	46,89	11,57	47,28	11,96
4,07	35,01	P11	42,72	7,71	43,37	8,36
4,70	34,78	P12	41,12	6,34	41,80	7,02
5,32	34,54	P13	40,29	5,75	41,08	6,54
5,93	34,27	P14	40,39	6,11	41,22	6,95
6,39	34,06	P15	41,38	7,32	42,09	8,03
6,84	33,84	P16	44,45	10,61	45,11	11,27
7,32	33,68	P17	44,16	10,48	44,75	11,07
8,63	33,36	P18	40,95	7,59	41,66	8,30
9,95	33,04	P19	40,29	7,25	41,08	8,04
11,26	32,71	P20	40,27	7,56	41,04	8,33
12,58	32,39	P21	40,63	8,24	41,39	9,00
13,90	32,07	P22	43,35	11,28	44,00	11,93
14,69	32,00	P23	42,55	10,55	43,27	11,27
17,19	32,00	P24	39,90	7,90	40,75	8,75
19,69	32,00	P25	39,78	7,78	40,57	8,57
22,19	32,00	P26	39,88	7,88	40,57	8,57
24,69	32,00	P27	40,10	8,10	40,72	8,72
27,19	32,00	P28	40,38	8,38	40,92	8,92
29,69	32,00	P29	40,58	8,58	41,03	9,03

TABELA 17 - PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 3.1 E 3.2

Posição		Identificação	Ensaio			
Abcissa (m)	Elevação (m)		3.1		3.2	
			Cota Piez (m)	Pressão (m)	Cota Piez (m)	Pressão (Tipo)
-8,74	30,09	P01	55,79	25,70	55,69	25,60
-6,97	31,87	P02	55,69	23,82	55,59	23,72
-5,28	33,55	P03	55,34	21,79	55,28	21,73
-4,08	34,56	P04	54,65	20,09	54,70	20,14
-2,81	35,24	P05	53,72	18,48	53,88	19,64
-1,43	35,66	P06	52,17	16,51	52,57	16,91
0,00	35,80	P07	49,75	13,95	50,46	14,66
1,04	35,73	P08	47,17	12,05	48,73	13,00
2,07	35,56	P09	45,45	9,89	46,70	11,14
3,08	35,32	P10	43,17	7,85	44,69	9,37
4,07	35,01	P11	41,90	6,89	43,60	8,59
4,70	34,78	P12	41,77	6,89	43,52	8,74
5,32	34,54	P13	41,92	7,38	43,60	9,06
5,93	34,27	P14	42,47	8,20	44,12	9,85
6,39	34,06	P15	43,50	9,44	45,00	10,94
6,84	33,84	P16	46,13	12,29	47,30	13,46
7,32	33,68	P17	46,09	12,41	47,27	13,59
8,63	33,36	P18	43,55	10,19	45,05	11,69
9,95	33,04	P19	42,94	9,90	44,53	11,49
11,26	32,71	P20	43,05	10,34	44,65	11,94
12,58	32,39	P21	43,74	11,35	45,23	12,84
13,90	32,07	P22	46,27	14,20	47,40	15,33
14,69	32,00	P23	45,68	13,68	46,85	14,85
17,19	32,00	P24	42,70	10,70	44,20	12,20
19,69	32,00	P25	42,12	10,12	43,63	11,63
22,19	32,00	P26	42,17	10,17	43,50	11,50
24,69	32,00	P27	42,41	10,41	43,57	11,57
27,19	32,00	P28	42,65	10,65	43,68	11,68
29,69	32,00	P29	42,80	10,80	43,73	11,73

TABELA 18 - PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA DO VERTEDOURO E DA BACIA DE DISSIPACÃO – ENSIAOS 4.1 E 4.2

Posição		Identificação	Ensaio			
Abcissa (m)	Elevação (m)		4.1		4.2	
			Cota Piez (m)	Pressão (m)	Cota Piez (m)	Pressão (Tipo)
-8,74	30,09	P01	55,60	23,51	55,63	25,54
-6,97	31,87	P02	55,41	23,54	55,47	23,60
-5,28	33,55	P03	54,78	21,23	54,91	21,36
-4,08	34,56	P04	53,59	19,03	53,87	19,31
-2,81	35,24	P05	52,08	16,84	52,50	17,26
-1,43	35,66	P06	49,93	14,27	50,60	14,94
0,00	35,80	P07	47,30	11,50	48,25	12,45
1,04	35,73	P08	45,95	10,22	16,95	11,22
2,07	35,56	P09	44,73	9,17	45,90	10,34
3,08	35,32	P10	43,73	8,41	45,05	9,73
4,07	35,01	P11	43,50	8,49	44,81	9,80
4,70	34,78	P12	43,77	8,99	45,03	10,25
5,32	34,54	P13	44,21	9,67	45,43	10,89
5,93	34,27	P14	44,96	10,65	46,07	11,80
6,39	34,06	P15	46,19	12,13	47,19	13,13
6,84	33,84	P16	47,80	13,96	48,62	14,78
7,32	33,68	P17	47,90	14,22	48,68	15,00
8,63	33,36	P18	46,07	12,71	47,03	13,67
9,95	33,04	P19	45,80	12,76	46,78	13,74
11,26	32,71	P20	46,02	13,31	47,00	14,29
12,58	32,39	P21	46,66	14,27	47,55	15,16
13,90	32,07	P22	48,42	16,35	49,15	17,08
14,69	32,00	P23	47,96	15,96	48,75	16,75
17,19	32,00	P24	45,58	13,58	46,54	14,54
19,69	32,00	P25	44,88	12,88	45,75	13,75
22,19	32,00	P26	44,73	12,73	45,63	13,63
24,69	32,00	P27	44,89	12,89	45,60	13,60
27,19	32,00	P28	45,01	13,01	45,68	13,68
29,69	32,00	P29	45,19	13,19	45,73	13,73

FIGURA 51 – LINHAS PIEZOMETRICAS – ENSAIOS INICIAIS

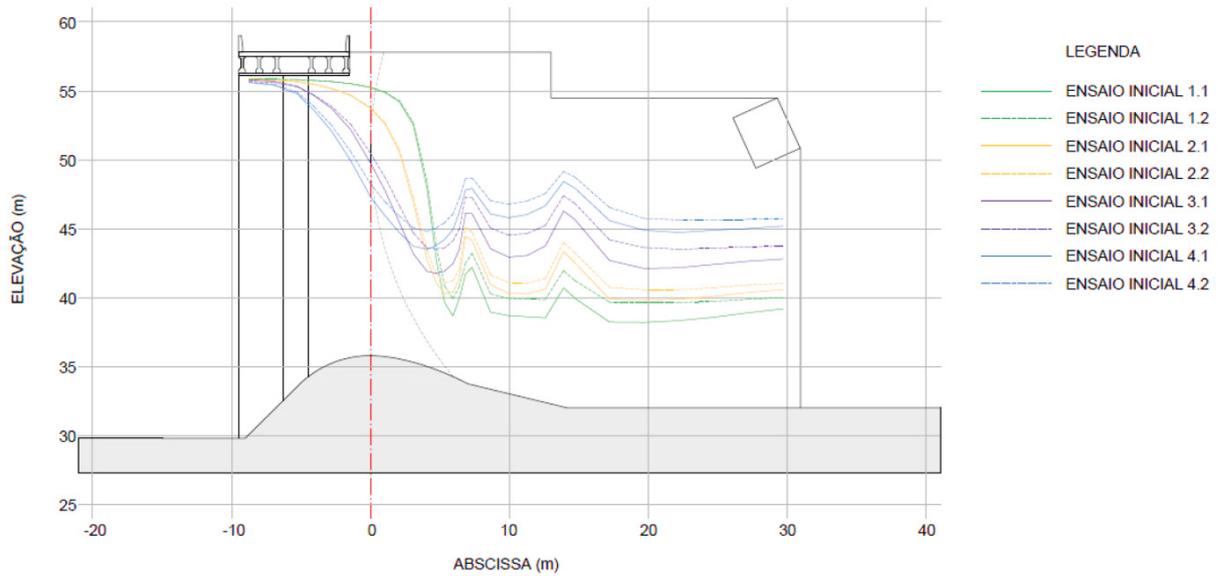


TABELA 19 – PRESSÕES MÉDIAS AO LONGO DA SOLEIRA MEDIDOS COM TRANSMISSORES DE PRESSÃO – ESTUDOS INICIAIS

Tomada de Pressão	Pressão Média (m.c.a)							
	Ensaio Inicial							
	1.1	1.2	2.1	2.2	4.1	4.2	6.1	6.2
T01	12,76	13,31	7,65	8,28	6,81	8,59	8,52	9,93
T02	7,74	8,80	5,92	6,66	6,66	8,44	8,78	10,09
T03	4,34	5,60	5,16	5,81	6,80	8,57	9,71	10,46
T04	3,30	4,73	5,27	5,97	7,43	9,09	9,91	11,08
T05	12,89	13,34	7,78	8,03	6,77	8,70	7,89	9,76
T06	7,84	8,85	6,10	6,83	6,74	8,55	8,77	10,10
T07	4,59	5,81	5,30	6,06	6,88	8,66	9,16	10,38
T08	3,61	4,94	5,48	6,17	7,47	9,18	9,89	11,07
T09	12,71	13,33	7,47	8,09	6,79	8,56	8,39	9,84
T10	7,69	8,76	5,82	6,54	6,64	8,39	8,69	10,07
T11	4,28	5,70	5,06	5,83	6,83	8,61	9,06	10,43
T12	3,48	4,91	5,74	6,12	7,41	9,20	9,83	11,04

## APÊNDICE 4 – PRESSÕES NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA

### A.1 ENSAIOS INICIAIS

TABELA 20 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 1.1

ENSAIO INICIAL 1.1							
SENSOR		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	0.91	0.90	0.91	0.90	0.90	0.91
	S02	1.16	1.15	1.15	1.16	1.15	1.15
	S03	1.37	1.38	1.42	1.41	1.43	1.45
	S04	1.18	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
	S05	1.18	1.15	1.14	1.14	1.14	1.16
	S06	1.13	1.11	1.10	1.10	1.10	1.13
	S07	1.16	1.17	1.18	1.18	1.17	1.18
	S08	0.92	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
INFERIOR MONTANTE	S09	0.79	0.70	0.77	0.73	0.77	0.78
	S10	1.35	1.33	1.33	1.34	1.33	1.31
	S11	1.20	1.18	1.18	1.19	1.15	1.16
	S12	1.49	1.51	1.40	1.49	1.48	1.49
	S13	1.56	1.58	1.58	1.52	1.58	1.58
	S14	1.02	1.10	1.07	1.05	1.03	1.08
	S15	1.16	1.22	1.20	1.14	1.17	1.11
	S16	0.76	0.74	0.78	0.77	0.78	0.76
SUPERIOR JUSANTE	S17	0.33	0.32	0.33	0.33	0.32	0.32
	S18	0.53	0.52	0.53	0.53	0.53	0.53
	S19	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
	S20	0.56	0.56	0.56	0.56	0.56	0.55
	S21	0.56	0.55	0.55	0.56	0.55	0.55
	S22	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
	S23	0.48	0.48	0.49	0.48	0.49	0.49
	S24	0.30	0.30	0.30	0.29	0.30	0.30
INFERIOR JUSANTE	S25	0.33	0.33	0.24	0.21	0.34	0.31
	S26	0.56	0.56	0.59	0.59	0.59	0.55
	S27	0.44	0.44	0.44	0.38	0.45	0.44
	S28	0.81	0.81	0.80	0.79	0.80	0.78
	S29	0.48	0.48	0.72	0.71	0.74	0.73
	S30	0.47	0.47	0.47	0.46	0.47	0.46
	S31	0.71	0.71	0.72	0.67	0.66	0.68
	S32	0.28	0.28	0.35	0.28	0.35	0.25

TABELA 21 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 1.2

ENSAIO INICIAL 1.2							
SENSOR		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	1.99	1.98	1.98	1.98	1.97	1.98
	S02	2.17	2.18	2.18	2.15	2.15	2.17
	S03	2.14	2.16	2.15	2.13	2.14	2.16
	S04	2.33	2.33	2.31	2.31	2.31	2.32
	S05	2.30	2.30	2.29	2.28	2.28	2.28
	S06	2.13	2.12	2.11	2.11	2.10	2.10
	S07	2.14	2.13	2.12	2.12	2.12	2.12
	S08	1.98	1.97	1.96	1.96	1.94	1.95
INFERIOR MONTANTE	S09	2.31	2.30	2.30	2.31	2.29	2.31
	S10	2.61	2.64	2.62	2.58	2.61	2.63
	S11	2.51	2.53	2.52	2.49	2.50	2.52
	S12	2.76	2.77	2.74	2.73	2.75	2.75
	S13	2.76	2.77	2.74	2.75	2.78	2.77
	S14	2.47	2.45	2.44	2.44	2.44	2.42
	S15	2.58	2.55	2.55	2.55	2.55	2.54
	S16	2.32	2.31	2.30	2.31	2.29	2.31
SUPERIOR JUSANTE	S17	1.38	1.37	1.38	1.37	1.36	1.37
	S18	1.55	1.56	1.54	1.53	1.54	1.56
	S19	1.55	1.56	1.55	1.53	1.54	1.55
	S20	1.66	1.67	1.65	1.64	1.64	1.65
	S21	1.65	1.65	1.64	1.63	1.64	1.66
	S22	1.52	1.51	1.50	1.51	1.52	1.53
	S23	1.49	1.48	1.46	1.47	1.46	1.47
	S24	1.37	1.37	1.36	1.36	1.34	1.36
INFERIOR JUSANTE	S25	1.67	1.67	1.67	1.66	1.65	1.67
	S26	1.94	1.94	1.94	1.91	1.92	1.94
	S27	1.90	1.91	1.91	1.87	1.90	1.92
	S28	2.13	2.14	2.12	2.11	2.12	2.13
	S29	2.10	2.11	2.09	2.08	2.09	2.09
	S30	1.84	1.82	1.82	1.82	1.83	1.82
	S31	2.05	2.06	2.06	2.05	2.02	1.97
	S32	1.70	1.70	1.69	1.70	1.67	1.68

TABELA 22 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 2.1

SENSOR		ENSAIO INICIAL 2.1					
		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	0.92	0.91	0.91	0.92	0.93	0.92
	S02	1.16	1.16	1.16	1.16	1.15	1.15
	S03	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
	S04	1.17	1.17	1.16	1.19	1.21	1.17
	S05	1.17	1.16	1.16	1.16	1.16	1.14
	S06	1.14	1.13	1.12	1.12	1.13	1.11
	S07	1.18	1.17	1.17	1.17	1.17	1.15
	S08	0.95	0.94	0.94	0.94	0.94	0.93
INFERIOR MONTANTE	S09	0.79	0.77	0.74	0.80	0.73	0.78
	S10	1.22	1.38	1.40	1.41	1.43	1.40
	S11	1.06	1.19	1.22	1.22	1.23	1.22
	S12	1.63	1.63	1.65	1.69	1.65	1.61
	S13	1.79	1.78	1.77	1.78	1.75	1.73
	S14	1.15	1.13	1.04	1.08	1.12	1.07
	S15	1.32	1.26	1.32	1.35	1.33	1.32
	S16	0.75	0.77	0.78	0.79	0.80	0.76
SUPERIOR JUSANTE	S17	0.43	0.43	0.43	0.43	0.44	0.43
	S18	0.51	0.51	0.52	0.53	0.53	0.53
	S19	0.62	0.62	0.62	0.62	0.61	0.61
	S20	0.66	0.66	0.65	0.65	0.63	0.63
	S21	0.66	0.65	0.65	0.65	0.65	0.62
	S22	0.57	0.56	0.56	0.56	0.57	0.56
	S23	0.54	0.53	0.53	0.55	0.55	0.55
	S24	0.59	0.63	0.61	0.62	0.63	0.66
INFERIOR JUSANTE	S25	0.42	0.29	0.23	0.40	0.43	0.42
	S26	0.68	0.75	0.76	0.77	0.76	0.76
	S27	0.54	0.57	0.56	0.45	0.53	0.59
	S28	1.02	1.04	1.02	1.04	1.00	0.98
	S29	0.81	0.84	0.91	0.90	0.92	0.92
	S30	0.61	0.57	0.56	0.58	0.58	0.55
	S31	0.45	0.45	0.50	0.56	0.62	0.65
	S32	0.58	0.60	0.64	0.49	0.67	0.56

TABELA 23 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 2.2

ENSAIO INICIAL 2.2							
SENSOR		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	1.44	1.45	1.43	1.42	1.44	1.44
	S02	1.66	1.67	1.64	1.63	1.65	1.71
	S03	2.29	2.30	2.27	2.29	2.28	2.34
	S04	1.80	1.79	1.78	1.78	1.78	1.78
	S05	1.80	1.79	1.77	1.77	1.78	1.79
	S06	1.61	1.60	1.57	1.57	1.58	1.60
	S07	1.62	1.62	1.60	1.59	1.60	1.62
	S08	1.24	1.20	1.15	1.13	1.15	1.12
INFERIOR MONTANTE	S09	1.70	1.71	1.69	1.68	1.71	1.74
	S10	2.22	2.21	2.18	2.17	2.15	2.20
	S11	2.01	2.03	2.01	2.01	2.01	2.01
	S12	1.71	1.72	1.70	1.69	1.71	1.68
	S13	2.48	2.46	2.42	2.43	2.41	2.45
	S14	1.95	1.95	1.92	1.91	1.92	1.96
	S15	2.15	2.17	2.14	2.15	2.14	2.18
	S16	1.38	1.39	1.37	1.36	1.38	1.38
SUPERIOR JUSANTE	S17	0.91	0.89	0.87	0.86	0.88	0.86
	S18	1.09	1.10	1.09	1.08	1.10	1.12
	S19	1.10	1.12	1.10	1.09	1.11	1.10
	S20	1.21	1.21	1.20	1.19	1.20	1.18
	S21	1.23	1.23	1.22	1.21	1.22	1.23
	S22	1.07	1.07	1.06	1.06	1.07	1.09
	S23	1.06	1.06	1.05	1.05	1.05	1.07
	S24	0.90	0.91	0.89	0.89	0.90	0.92
INFERIOR JUSANTE	S25	1.12	1.12	1.10	1.10	1.11	1.12
	S26	1.55	1.55	1.52	1.52	1.53	1.52
	S27	1.45	1.45	1.44	1.44	1.45	1.47
	S28	1.80	1.79	1.78	1.80	1.77	1.84
	S29	1.77	1.78	1.77	1.79	1.77	1.80
	S30	1.38	1.38	1.37	1.37	1.37	1.41
	S31	1.51	1.50	1.49	1.49	1.49	1.52
	S32	1.14	1.19	1.19	1.19	1.21	1.24

TABELA 24 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 3.1

ENSAIO INICIAL 3.1							
SENSOR		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.82
	S02	0.94	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90
	S03	0.84	0.83	0.83	0.82	0.82	0.82
	S04	0.96	0.95	0.94	0.94	0.94	0.93
	S05	0.96	0.95	0.94	0.94	0.93	0.93
	S06	0.89	0.88	0.87	0.87	0.86	0.85
	S07	0.94	0.92	0.91	0.90	0.90	0.89
	S08	0.77	0.76	0.76	0.76	0.76	0.75
INFERIOR MONTANTE	S09	0.45	0.49	0.52	0.39	0.43	0.48
	S10	0.65	0.77	0.65	0.48	0.45	0.75
	S11	0.72	0.68	0.71	0.71	0.68	0.71
	S12	0.95	0.83	0.91	0.93	0.93	0.69
	S13	0.80	0.83	0.82	0.76	0.76	0.83
	S14	0.67	0.66	0.65	0.65	0.67	0.63
	S15	0.50	0.80	0.80	0.79	0.75	0.53
	S16	0.39	0.42	0.42	0.48	0.45	0.39
SUPERIOR JUSANTE	S17	0.40	0.39	0.38	0.37	0.37	0.34
	S18	0.49	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48
	S19	0.49	0.47	0.47	0.46	0.47	0.48
	S20	0.47	0.44	0.42	0.41	0.41	0.40
	S21	0.49	0.48	0.47	0.46	0.46	0.45
	S22	0.49	0.48	0.47	0.47	0.47	0.46
	S23	0.47	0.46	0.46	0.45	0.45	0.44
	S24	0.35	0.34	0.34	0.34	0.34	0.33
INFERIOR JUSANTE	S25	0.31	0.29	0.30	0.29	0.30	0.27
	S26	0.35	0.39	0.38	0.32	0.38	0.39
	S27	0.43	0.40	0.41	0.41	0.41	0.41
	S28	0.53	0.51	0.48	0.49	0.44	0.49
	S29	0.21	0.42	0.39	0.41	0.44	0.37
	S30	0.40	0.38	0.39	0.40	0.340	0.38
	S31	0.45	0.43	0.43	0.42	0.36	0.40
	S32	0.18	0.17	0.27	0.31	0.21	0.30

TABELA 25 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 3.2

ENSAIO INICIAL 3.2							
SENSOR		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	1.81	1.79	1.80	1.80	1.80	1.80
	S02	2.05	2.03	2.06	2.07	2.07	2.07
	S03	1.96	1.94	1.95	1.96	1.96	1.96
	S04	2.17	2.15	2.16	2.16	2.17	2.16
	S05	2.14	2.13	2.14	2.14	2.14	2.14
	S06	1.95	1.94	1.95	1.95	1.94	1.93
	S07	2.03	2.02	2.03	2.03	2.02	2.01
	S08	1.84	1.82	1.84	1.83	1.83	1.82
INFERIOR MONTANTE	S09	2.13	2.11	2.10	2.10	2.11	2.11
	S10	2.52	2.53	2.53	2.55	2.52	2.51
	S11	2.39	2.38	2.38	2.40	2.38	2.38
	S12	2.66	2.66	2.68	2.67	2.67	2.67
	S13	2.86	2.85	2.86	2.87	2.87	2.84
	S14	2.38	2.37	2.39	2.39	2.37	2.37
	S15	2.45	2.44	2.45	2.46	2.45	2.45
	S16	2.09	2.08	2.11	2.09	2.09	2.09
SUPERIOR JUSANTE	S17	1.42	1.42	1.43	1.43	1.43	1.42
	S18	1.46	1.44	1.44	1.44	1.45	1.44
	S19	1.53	1.52	1.53	1.53	1.53	1.53
	S20	1.70	1.70	1.72	1.71	1.71	1.71
	S21	1.72	1.71	1.72	1.71	1.72	1.71
	S22	1.49	1.47	1.49	1.48	1.48	1.47
	S23	1.52	1.51	1.52	1.52	1.51	1.51
	S24	1.35	1.34	1.36	1.35	1.35	1.34
INFERIOR JUSANTE	S25	1.73	1.73	1.72	1.71	1.71	1.69
	S26	1.94	1.94	1.94	1.95	1.93	1.95
	S27	1.79	1.81	1.75	1.77	1.79	1.79
	S28	2.19	2.19	2.20	2.22	2.20	2.20
	S29	2.20	2.16	2.20	2.20	2.20	2.18
	S30	1.92	1.88	1.91	1.92	1.90	1.90
	S31	2.01	1.99	2.02	2.02	2.01	1.99
	S32	1.66	1.65	1.67	1.65	1.65	1.64

TABELA 26 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 4.1

SENSOR		ENSAIO INICIAL 4.1					
		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	0.78	0.77	0.78	0.77	0.78	0.78
	S02	0.90	0.89	0.89	0.88	0.88	0.89
	S03	0.84	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
	S04	0.88	0.90	0.89	0.88	0.89	0.91
	S05	0.89	0.89	0.88	0.88	0.88	0.89
	S06	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87	0.87
	S07	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88
	S08	0.80	0.79	0.80	0.80	0.80	0.80
INFERIOR MONTANTE	S09	0.52	0.37	0.62	0.61	0.40	0.63
	S10	0.75	0.85	0.85	0.55	0.75	0.86
	S11	0.50	0.49	0.49	0.45	0.45	0.50
	S12	0.90	0.90	0.77	0.91	0.91	0.81
	S13	0.96	0.99	0.94	0.94	0.87	0.97
	S14	0.65	0.70	0.74	0.75	0.76	0.72
	S15	0.82	0.53	0.80	0.53	0.81	0.69
	S16	0.51	0.55	0.62	0.58	0.56	0.59
SUPERIOR JUSANTE	S17	0.50	0.49	0.49	0.47	0.48	0.49
	S18	0.50	0.51	0.51	0.52	0.52	0.51
	S19	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.57
	S20	0.57	0.57	0.57	0.56	0.56	0.57
	S21	0.56	0.56	0.55	0.55	0.55	0.56
	S22	0.53	0.53	0.53	0.54	0.53	0.54
	S23	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54	0.54
	S24	0.44	0.43	0.44	0.45	0.44	0.44
INFERIOR JUSANTE	S25	0.51	0.43	0.33	0.46	0.48	0.42
	S26	0.46	0.55	0.55	0.56	0.56	0.58
	S27	0.50	0.52	0.51	0.49	0.48	0.54
	S28	0.70	0.70	0.66	0.69	0.66	0.70
	S29	0.62	0.55	0.62	0.52	0.51	0.63
	S30	0.57	0.57	0.59	0.59	0.58	0.58
	S31	0.57	0.57	0.58	0.50	0.56	0.57
	S32	0.35	0.46	0.39	0.50	0.40	0.43

TABELA 27 – PRESSÕES MÉDIAS – ENSAIO INICIAL 4.2

ENSAIO INICIAL 4.2							
SENSOR		PRESSÃO MÉDIA (m.c.a.)					
		15	50	100	250	500	1000
SUPERIOR MONTANTE	S01	1.44	1.43	1.43	1.43	1.44	1.43
	S02	1.53	1.56	1.56	1.57	1.58	1.57
	S03	1.54	1.52	1.53	1.53	1.53	1.53
	S04	1.71	1.69	1.69	1.69	1.69	1.69
	S05	1.63	1.62	1.62	1.62	1.61	1.61
	S06	1.49	1.49	1.47	1.48	1.47	1.45
	S07	1.51	1.50	1.49	1.49	1.49	1.47
	S08	1.43	1.43	1.41	1.42	1.42	1.41
INFERIOR MONTANTE	S09	1.78	1.79	1.79	1.79	1.79	1.80
	S10	2.04	2.02	2.04	2.03	2.02	2.01
	S11	1.97	1.94	1.96	1.96	1.96	1.95
	S12	2.05	2.10	2.09	2.08	2.12	2.13
	S13	2.09	2.06	2.05	2.05	2.04	2.01
	S14	1.89	1.87	1.86	1.87	1.86	1.84
	S15	1.71	1.70	1.70	1.72	1.71	1.70
	S16	1.78	1.78	1.79	1.79	1.74	1.80
SUPERIOR JUSANTE	S17	1.03	1.02	1.03	1.03	1.03	1.02
	S18	1.26	1.25	1.27	1.27	1.27	1.27
	S19	1.22	1.20	1.21	1.22	1.22	1.21
	S20	1.27	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
	S21	1.30	1.29	1.29	1.29	1.28	1.27
	S22	1.22	1.22	1.21	1.21	1.21	1.20
	S23	1.18	1.18	1.17	1.18	1.18	1.16
	S24	1.09	1.09	1.08	1.08	1.09	1.08
INFERIOR JUSANTE	S25	1.38	1.37	1.37	1.38	1.37	1.37
	S26	1.62	1.60	1.62	1.61	1.61	1.60
	S27	1.60	1.59	1.62	1.62	1.63	1.63
	S28	1.75	1.78	1.79	1.72	1.80	1.78
	S29	1.76	1.74	1.74	1.74	1.74	1.73
	S30	1.55	1.53	1.53	1.54	1.52	1.52
	S31	1.60	1.59	1.57	1.59	1.58	1.57
	S32	1.52	1.51	1.51	1.52	1.52	1.52

## A.2 ENSAIOS FINAIS

TABELA 28 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 3.2

ENSAIO FINAL 3.2					
SENSOR		PRESSÃO (m.c.a.)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
SUPERIOR MONTANTE	S01	0,75	0,056	0,67	1,18
	S02	0,91	0,057	0,79	1,31
	S03	0,87	0,054	0,76	1,22
	S04	0,86	0,058	0,76	1,38
	S05	0,91	0,058	0,82	1,58
	S06	0,91	0,044	0,83	1,27
	S07	0,93	0,045	0,86	1,36
	S08	0,77	0,052	0,68	1,13
INFERIOR MONTANTE	S09	0,46	0,178	-0,09	1,34
	S10	0,69	0,276	0,12	1,65
	S11	0,60	0,255	0,11	1,53
	S12	0,67	0,316	-0,02	1,82
	S13	0,76	0,312	0,16	2,35
	S14	0,61	0,248	0,07	1,68
	S15	0,66	0,253	0,16	1,71
	S16	0,40	0,180	-0,08	1,22
SUPERIOR JUSANTE	S17	0,35	0,051	0,28	0,69
	S18	0,40	0,050	0,29	0,68
	S19	0,45	0,053	0,32	0,77
	S20	0,49	0,049	0,40	1,03
	S21	0,51	0,051	0,41	1,13
	S22	0,42	0,040	0,34	0,77
	S23	0,46	0,041	0,37	0,92
	S24	0,31	0,050	0,22	0,69
INFERIOR JUSANTE	S25	0,11	0,077	-0,07	0,67
	S26	0,41	0,144	0,20	1,07
	S27	0,05	0,134	-0,17	0,77
	S28	0,48	0,204	-0,03	1,60
	S29	0,22	0,177	-0,09	1,28
	S30	0,14	0,125	-0,06	0,99
	S31	0,32	0,139	0,09	1,15
	S32	0,14	0,088	-0,02	0,59

TABELA 29 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 3.6

ENSAIO FINAL 3.6					
SENSOR		PRESSÃO (m.c.a.)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
SUPERIOR MONTANTE	S01	2,49	0,229	1,60	3,18
	S02	2,60	0,250	1,65	3,38
	S03	2,62	0,247	1,71	3,36
	S04	2,78	0,241	1,74	3,49
	S05	2,78	0,239	1,53	3,57
	S06	2,61	0,260	1,41	3,40
	S07	2,60	0,253	1,37	3,41
	S08	2,50	0,238	1,59	3,34
INFERIOR MONTANTE	S09	2,82	0,224	1,91	3,43
	S10	3,09	0,226	2,32	3,76
	S11	3,00	0,246	2,20	3,78
	S12	3,22	0,222	2,11	3,90
	S13	3,21	0,217	2,42	3,87
	S14	3,00	0,255	1,53	3,83
	S15	3,11	0,235	1,80	3,76
	S16	2,86	0,218	1,63	3,44
SUPERIOR JUSANTE	S17	2,06	0,230	1,20	2,73
	S18	2,17	0,249	1,32	3,00
	S19	2,18	0,243	1,27	2,93
	S20	2,33	0,237	1,22	3,01
	S21	2,32	0,235	1,12	3,07
	S22	2,17	0,260	1,04	2,95
	S23	2,16	0,256	1,14	2,95
	S24	2,07	0,239	0,98	2,75
INFERIOR JUSANTE	S25	2,39	0,212	1,54	2,97
	S26	2,57	0,209	1,87	3,15
	S27	2,55	0,245	1,52	3,33
	S28	2,73	0,216	1,45	3,39
	S29	2,69	0,207	1,92	3,28
	S30	2,52	0,253	1,32	3,24
	S31	2,51	0,231	1,21	3,11
	S32	2,32	0,227	1,25	3,07

TABELA 30 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 4.2

		ENSAIO FINAL 4.2			
SENSOR		PRESSÃO (m.c.a.)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
SUPERIOR MONTANTE	S01	0,54	0,018	0,49	0,69
	S02	0,42	0,030	0,31	0,53
	S03	0,41	0,027	0,31	0,53
	S04	0,51	0,046	0,43	0,66
	S05	0,49	0,044	0,42	0,62
	S06	0,65	0,010	0,61	0,71
	S07	0,63	0,013	0,59	0,69
	S08	0,51	0,025	0,45	0,62
INFERIOR MONTANTE	S09	0,01	0,038	-0,08	0,50
	S10	-0,03	0,051	-0,14	0,39
	S11	-0,01	0,046	-0,11	0,52
	S12	0,00	0,052	-0,10	0,40
	S13	0,02	0,054	-0,07	0,49
	S14	-0,03	0,041	-0,12	0,27
	S15	0,01	0,050	-0,09	0,42
	S16	0,02	0,038	-0,08	0,44
SUPERIOR JUSANTE	S17	0,17	0,017	0,12	0,32
	S18	0,21	0,029	0,11	0,34
	S19	0,13	0,032	0,01	0,25
	S20	0,19	0,044	0,11	0,33
	S21	0,16	0,044	0,07	0,32
	S22	0,34	0,014	0,29	0,39
	S23	0,34	0,013	0,30	0,39
	S24	0,20	0,027	0,12	0,30
INFERIOR JUSANTE	S25	-0,05	0,016	-0,12	0,11
	S26	-0,02	0,018	-0,11	0,11
	S27	0,03	0,018	-0,07	0,20
	S28	-0,03	0,022	-0,15	0,31
	S29	-0,04	0,021	-0,14	0,20
	S30	-0,02	0,015	-0,12	0,39
	S31	-0,04	0,015	-0,13	0,29
	S32	0,00	0,016	-0,07	0,29

TABELA 31 – PRESSÕES – ENSAIO FINAL 4.5

		ENSAIO FINAL 4.5			
SENSOR		PRESSÃO (m.c.a.)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
SUPERIOR MONTANTE	S01	2,54	0,233	1,71	3,19
	S02	2,75	0,252	1,96	3,49
	S03	2,71	0,249	1,97	3,43
	S04	2,84	0,223	1,95	3,50
	S05	2,75	0,226	1,86	3,55
	S06	2,66	0,242	1,69	3,57
	S07	2,71	0,245	1,72	3,63
	S08	2,55	0,232	1,58	3,21
INFERIOR MONTANTE	S09	2,83	0,230	2,00	3,47
	S10	3,13	0,217	2,34	3,85
	S11	3,03	0,238	2,31	3,78
	S12	3,20	0,204	2,30	3,92
	S13	3,15	0,207	2,23	3,76
	S14	2,99	0,212	2,09	3,52
	S15	3,05	0,210	2,15	3,62
	S16	2,85	0,225	1,93	3,47
SUPERIOR JUSANTE	S17	2,27	0,231	1,46	2,90
	S18	2,22	0,252	1,42	2,94
	S19	2,31	0,245	1,53	3,00
	S20	2,45	0,223	1,54	3,24
	S21	2,48	0,225	1,54	3,14
	S22	2,28	0,243	1,34	3,15
	S23	2,30	0,241	1,33	3,18
	S24	2,17	0,230	1,28	2,82
INFERIOR JUSANTE	S25	2,64	0,224	1,90	3,28
	S26	2,77	0,208	2,08	3,44
	S27	2,56	0,220	1,87	3,28
	S28	2,90	0,196	2,11	3,45
	S29	2,81	0,204	1,91	3,35
	S30	2,66	0,228	1,64	3,40
	S31	2,75	0,205	1,80	3,41
	S32	2,46	0,178	1,73	2,95

## APÊNDICE 5 – ESFORÇOS NA VIGA INFERIOR DA COMPORTA

TABELA 32 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 3.3

ENSAIO FINAL 3.3					
SENSOR		ESFORÇOS (tf)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
MONTANTE	S01 – S09	0,80	0,42	-1,04	2,26
	S02 – S10	0,51	0,61	-1,78	2,07
	S03 - S11	0,64	0,56	-1,63	1,85
	S04 – S12	0,41	0,54	-1,49	1,75
	S05 – S13	0,35	0,70	-2,16	1,83
	S06 – S14	0,72	0,55	-1,49	2,29
	S07 - S15	0,63	0,56	-1,34	1,85
	S08 – S16	1,03	0,46	-0,96	2,72
JUSANTE	S17 – S25	0,55	0,15	-0,27	1,18
	S18 – S26	-0,03	0,31	-1,67	0,82
	S19 – S27	0,95	0,30	-0,92	1,92
	S20 – S28	0,84	0,27	-0,57	1,79
	S21 – S29	0,69	0,37	-1,34	1,50
	S22 – S30	0,67	0,25	-0,80	1,16
	S23 – S31	0,33	0,29	-1,35	0,95
	S24 – S32	0,39	0,18	-0,54	1,11
VIGA TOTAL		9,49	21,25	-9,98	4,74

TABELA 33 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 3.6

ENSAIO FINAL 3.6					
SENSOR		ESFORÇOS (tf)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
MONTANTE	S01 – S09	-0,91	0,39	-2,64	1,36
	S02 – S10	-1,15	0,30	-2,59	-0,03
	S03 - S11	-0,89	0,34	-2,88	0,89
	S04 – S12	-1,04	0,47	-3,20	1,01
	S05 – S13	-1,01	0,46	-2,87	0,86
	S06 – S14	-0,92	0,44	-3,06	0,98
	S07 - S15	-1,19	0,33	-2,77	0,00
	S08 – S16	-0,98	0,36	-2,64	0,97
JUSANTE	S17 – S25	-0,73	0,15	-1,50	0,39
	S18 – S26	-0,96	0,41	-2,72	1,31
	S19 – S27	-0,89	0,42	-2,70	1,19
	S20 – S28	-0,97	0,37	-2,85	0,98
	S21 – S29	-0,89	0,41	-2,83	0,74
	S22 – S30	-0,83	0,28	-2,20	0,61
	S23 – S31	-0,83	0,38	-2,90	1,01
	S24 – S32	-0,55	0,30	-1,84	0,91
VIGA TOTAL		-14,74	2,67	-24,91	-2,74

TABELA 34 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 4.2

		ENSAIO FINAL 4.2			
SENSOR		ESFORÇOS (tf)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
MONTANTE	S01 – S09	1,48	0,11	0,12	1,97
	S02 – S10	1,05	0,14	0,02	1,47
	S03 - S11	0,99	0,13	-0,30	1,34
	S04 – S12	1,21	0,17	0,12	1,68
	S05 – S13	1,11	0,17	-0,10	1,58
	S06 – S14	1,64	0,10	0,90	1,88
	S07 - S15	1,48	0,12	0,54	1,77
	S08 – S16	1,37	0,12	0,32	1,75
JUSANTE	S17 – S25	0,48	0,05	0,11	0,85
	S18 – S26	0,56	0,08	0,14	0,89
	S19 – S27	0,22	0,09	-0,20	0,57
	S20 – S28	0,51	0,12	-0,42	0,93
	S21 – S29	0,46	0,12	-0,23	0,95
	S22 – S30	0,85	0,05	-0,14	1,10
	S23 – S31	0,89	0,05	0,09	1,14
	S24 – S32	0,44	0,07	-0,09	0,73
VIGA TOTAL		14,76	0,87	9,09	17,25

TABELA 35 – ESFORÇOS – ENSAIO FINAL 4.5

ENSAIO FINAL 4.5					
SENSOR		ESFORÇOS (tf)			
		MÉDIA	DESVIO PADRÃO	MÍNIMO	MÁXIMO
MONTANTE	S01 – S09	-0,80	0,19	-1,64	0,50
	S02 – S10	-0,91	0,37	-2,63	0,94
	S03 - S11	-0,76	0,29	-2,12	0,76
	S04 – S12	-0,86	0,32	-2,10	0,48
	S05 – S13	-0,96	0,32	-2,25	0,79
	S06 – S14	-0,78	0,24	-1,84	0,77
	S07 - S15	-0,82	0,27	-2,16	0,80
	S08 – S16	-0,84	0,17	-1,63	0,46
JUSANTE	S17 – S25	-0,81	0,13	-1,58	0,15
	S18 – S26	-1,30	0,29	-2,47	0,17
	S19 – S27	-0,60	0,28	-1,65	0,73
	S20 – S28	-1,07	0,29	-2,27	0,16
	S21 – S29	-0,77	0,36	-2,64	1,03
	S22 – S30	-0,91	0,29	-2,06	0,58
	S23 – S31	-1,06	0,34	-2,59	0,64
	S24 – S32	-0,64	0,23	-1,77	0,62
VIGA TOTAL		-13,88	2,64	-0,41	-22,42