

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

ANDRESSA SCHUMACHER

IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES PROPÍCIAS A DANOS POR CAVITAÇÃO NA  
CALHA DE UM VERTEDOIRO EM DEGRAUS: ASPECTOS HIDRÁULICOS E  
GEOMÉTRICOS

PORTO ALEGRE

2020

ANDRESSA SCHUMACHER

IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES PROPÍCIAS A DANOS POR CAVITAÇÃO NA  
CALHA DE UM VERTEDOURO EM DEGRAUS: ASPECTOS HIDRÁULICOS E  
GEOMÉTRICOS

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

Orientador: Dr. Maurício Dai Prá  
Coorientador: Dr. Marcelo Giulian Marques

PORTO ALEGRE

2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Schumacher, Andressa  
IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES PROPÍCIAS A DANOS POR  
CAVITAÇÃO NA CALHA DE UM VERTEDOIRO EM DEGRAUS:  
ASPECTOS HIDRÁULICOS E GEOMÉTRICOS / Andressa  
Schumacher. -- 2020.  
129 f.  
Orientador: MAURICIO DAI PRA.

Coorientador: MARCELO GIULIAN MARQUES.

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

1. Pressões mínimas extremas. 2. Vertedouro em  
Degraus. 3. Aeração. 4. Cavitação. I. DAI PRA,  
MAURICIO, orient. II. MARQUES, MARCELO GIULIAN,  
coorient. III. Título.

ANDRESSA SCHUMACHER

IDENTIFICAÇÃO DE REGIÕES PROPÍCIAS A DANOS POR CAVITAÇÃO NA  
CALHA DE UM VERTEDOURO EM DEGRAUS: ASPECTOS HIDRÁULICOS E  
GEOMÉTRICOS

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

Aprovado em: Porto Alegre, 10 de novembro de 2020.

---

Prof. Dr. Maurício Dai Prá – UFRGS  
Orientador

---

Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques – UFRGS  
Coorientador

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Mariane Kempka – UFTPR  
Examinadora

---

Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres – UFRGS  
Examinador

---

Prof. Dr.<sup>a</sup> Priscila dos Santos Priebe – IFSul  
Examinador

## **AGRADECIMENTOS**

Todo meu agradecimento à minha família, que sempre me proporcionou o amor mais especial e incondicional. Obrigada por demonstrarem um interesse tão grande e genuíno na minha felicidade, por serem a força propulsora do meu avanço, mesmo nos momentos mais difíceis e desacreditados. Apenas agradeço por todo o apoio e ajuda ao longo da minha vida, pois jamais serei capaz de recompensar devidamente a dedicação que sempre tiveram comigo. Pai, mãe e Duda, vocês são minha motivação todos os dias!

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Maurício Dai Prá, cuja dedicação e paciência, além de me manter focada, foram essenciais para trilhar a conclusão deste trabalho. Grata por ouvir e entender meus medos e dificuldades ao longo desses anos. Sem você eu não teria chegado até aqui!

Sou muito grata ao meu primeiro orientador e agora coorientador, Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques, por ser uma fonte de motivação e incentivo. Agradeço ainda às longas conversas sobre a vida, que tanto me fizeram refletir e aprender. Obrigada por entender e me auxiliar a conciliar minha vida de mestrandia com meu trabalho.

Agradeço ao meu primeiro chefe e grande amigo, Paulo Pontes, pelo incentivo e ajuda quando demonstrei interesse em me candidatar a uma vaga de mestrado. Com certeza esta ajuda foi essencial para me dar o primeiro empurrão.

Agradeço aos meus tantos amigos e companheiros de jornada que sempre me motivaram a continuar estudando e que foram fontes inesgotáveis de apoio durante o processo.

Nunca estive sozinha durante esses dois anos, sempre tive pessoas especiais ao meu lado, que me inspiraram, motivaram e me deram todo o apoio quando precisei. Não vou citar nomes para não ser injusta com os inúmeros anjos da guarda que tenho nesse plano. Sozinha eu não teria terminado este trabalho.

## RESUMO

O uso de vertedouros em degraus em barragens tem crescido significativamente desde a década de 70, devido a sua efetividade na redução de custos com material, construção e operação e sua capacidade em dissipar energia. Apesar dos grandes benefícios proporcionados, ainda existe uma lacuna de conhecimento em relação aos fatores que causam patologias e posteriores danos nesse tipo de estrutura hidráulica. Um dos fenômenos mais recorrente e com poder de dano é a cavitação, que ocorre quando a pressão no interior do fluxo escoado atinge o valor de pressão de vapor d'água, ocasionando a implosão das bolhas de baixa pressão, que quando em contato com a superfície hidráulica, danifica-a. Os danos causados pelo fenômeno podem comprometer o empreendimento, parando a operação de usinas de geração de energia para reparos, além de pôr em risco as populações ribeirinhas a jusante. Por isso, este trabalho tem como objetivo elaborar uma metodologia para identificar as regiões suscetíveis ou não aos danos relacionados ao fenômeno de cavitação em calhas de vertedouros em degraus, integrando aspectos geométricos e hidráulicos aos critérios de aeração, associados à proteção da superfície de concreto. Para isso, a pesquisa foi realizada em duas etapas: localização das principais posições dos pontos críticos relacionados às características do escoamento em vertedouros em degraus (início de aeração visual, local onde ocorre a menor pressão mínima extrema e o local onde a pressão mínima extrema passa a oscilar em torno de um valor médio constante); e delimitação das regiões de cavitação através de gráficos dados pela carga hidráulica total de uma barragem em função da vazão específica escoada. Para a determinação dos comprimentos críticos do escoamento, o estudo foi realizado a partir dos dados obtidos em três modelos de vertedouros em degraus com diferentes características geométricas. Ao longo da calha, foram realizadas leituras de pressões junto ao espelho dos degraus para diferentes vazões. Para determinação das regiões, os gráficos de cavitação foram delimitados em região sem cavitação, sem ocorrência de danos e com cavitação e com possibilidade de ocorrência de dano. A análise foi realizada a partir de equações que permitem localizar as regiões críticas relacionadas às regiões de baixa pressão e de aeração natural, em função das características geométricas e hidráulicas da estrutura. Assim, foram determinadas equações de comprimento crítico do escoamento deslizante sobre turbilhões para o ponto de mais baixa pressão ao longo da calha, bem como o início de aeração do fluxo, observando uma relação de 0,8 vezes do primeiro ponto ao segundo. Também foi possível determinar a equação do comprimento de aeração total, onde o fluxo está totalmente protegido contra os danos provocados pela cavitação. Ainda, foram delimitadas as regiões relacionadas ao fenômeno de cavitação e com possibilidade de dano em protótipos com diferentes características geométricas. Foi observado que maiores degraus geram o fenômeno em cargas hidráulicas menores e que maiores inclinações, em maiores cargas hidráulicas. Já a vazão demonstrou-se indiferente ao acréscimo de altura de degrau ou declividade. Foi observado também que a ocorrência de cavitação necessita de uma extensão de vertedouro compatível com a vazão escoada para que o fenômeno possa se desenvolver. Também foi notado que, quanto maior a inclinação da calha e menores as alturas dos degraus, a possibilidade de dano abrange um comprimento maior da extensão da calha.

**Palavras-chave:** Pressões mínimas extremas. Vertedouro em Degraus. Aeração. Cavitação.

## ABSTRACT

The use of stepped spillways in dams increased since the 1970s, because of the effectiveness in reducing costs with material, construction and operation and because of the ability to dissipate energy. Despite of those, there is a knowledge gap about the factors that cause pathologies and then damages on this type of hydraulic structure. One of the most recurrent and damaging phenomena is the cavitation, which occurs when the pressure inside the flow reaches the water vapor pressure value, causing the implosion of the low-pressure bubbles and, when in contact with the hydraulic surface, make a damage. The phenomenon could compromise the dam and stop the power generation for repairs, besides put the riverside populations downstream at risk. Because of these, this work aims to develop a methodology to identify the regions susceptible to damage of cavitation in stepped spillway, using different geometric and hydraulic aspects to match with aeration criteria, which has effectiveness of protection of the concrete surface. For this, the research was carried out in two stages: location of the main positions of the critical points related to the flow characteristics in stepped spillways (start of visual aeration, where the lowest extreme minimum pressure occurs and the location where the minimum extreme pressure oscillate around a constant mean value); and delimit the cavitation regions along the chute per figures of the total hydraulic load of a dam as a function of the specific flow. To determine the lengths, the study was carried out from the data obtained in three models of stepped spillways with different geometric characteristics. Along the chute, pressure readings were carried out next to the step mirror for different flows. To determine regions, the figures were delimited in a region without cavitation, with cavitation and without occurrence of damage and with cavitation and with the possibility of damage. The analysis was made from equations that allow to locate the critical regions related to the low-pressure regions, according to the geometric and hydraulic characteristics of the structure. Thus, length equations were determined for the point of lowest pressure along the chute, as well as the beginning of aeration of the flow, observing a relationship of 0.8 times more length from the first point to the second. It was also possible to determine the total aeration length equation, where the flow is fully protected against damage caused by cavitation. Still, the regions related to the phenomenon of cavitation and with the possibility of damage in prototypes with different geometric characteristics were delimited. It was observed that higher steps generate the phenomenon at lower heights and that greater slopes, at higher heights. The flow did not oscillate significantly despite of the increase of step high or slope of chute. It was also observed that the occurrence of cavitation requires an extension of the spillway compatible with the flow for the phenomenon to develop. It was also noted that the higher the slope of the chute and the lower the height of the steps, the possibility of damage covered a greater length of the chute extension.

**Keywords:** Extreme minimum pressures. Stepped Spillway. Aeration. Cavitation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Vertedouro em degraus com bacia de dissipação por ressalto hidráulico. ....	25
Figura 2 – Danos por cavitação no vertedouro de concreto na Barragem Kinzua Pennsylvania. ....	26
Figura 3 – Vertedouro em degraus da Barragem de Dona Francisca, no Rio Grande do Sul. ....	28
Figura 4 – Desenhos esquemáticos dos três regimes de escoamento (a- deslizante sobre turbilhões, b – transição, c – quedas sucessivas). ....	29
Figura 5 – Vertedouro em degraus em funcionamento submetido a escoamento deslizante sobre turbilhões – Barragem Opuha, Nova Zelândia. ....	30
Figura 6 – Regiões do escoamento ao longo de um vertedouro em degraus com regime de escoamento deslizantes. ....	32
Figura 7 – Formação de bolha de ar arrastada pelas gotas de água lançadas para fora do fluxo. ....	33
Figura 8 – Resultados de dados obtidos e modelos desenvolvidos por Gomes (2006) para determinar coeficiente de pressão extrema no patamar ao longo da calha (MTES – modelos teóricos-experimentais de previsão de pressão). ....	37
Figura 9 – Resultados de dados obtidos e modelos desenvolvidos por Gomes (2006) para determinar coeficiente de pressão extrema no espelho ao longo da calha. ....	38
Figura 10 – Coeficiente de pressões extremas nos espelhos dos degraus. ....	39
Figura 11 - Coeficiente de pressões extremas nos patamares dos degraus. ....	39
Figura 12 – Pressões médias e extremas nos patamares dos degraus da calha do vertedouro ( $\gamma$ – peso específico da água). ....	40
Figura 13 - Pressões médias e extremas nos espelhos dos degraus da calha do vertedouro. ....	40
Figura 14 - Comparativo do decaimento dos valores de pressão extremas mínimas no espelho. ....	43
Figura 15 – Colapso de uma bolha de vapor próxima a uma superfície. ....	45
Figura 16 – Colapso de uma bolha de vapor distante da superfície. ....	45
Figura 17 – Alcance de dano por cavitação. ....	47
Figura 18 – Danos causados por cavitação em função do tempo em uma superfície hidráulica de concreto. ....	49



Figura 19 – Danos de cavitação em vertedouro de calha lisa na Barragem de Shahid Abbaspour. ....	51
Figura 20 – Irregularidades existentes em superfícies hidráulicas de concreto. ....	52
Figura 21 – Variação do parâmetro crítico de cavitação em ressalto com chanfros. ....	54
Figura 22 – Concentrações médias de ar em diferentes distâncias do pseudo-fundo da estrutura. ....	55
Figura 23 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho. ....	58
Figura 24 – Esquema das estruturas hidráulicas dos modelos utilizados. ....	59
Figura 25 – Esquema de ponto de tomada de pressão nas quinas dos degraus (dimensões em milímetros). ....	61
Figura 26 – Observação do escoamento para identificação das posições de início de aeração e aeração total. ....	63
Figura 27 – Esquema prático das configurações do vertedouro em degraus utilizado na metodologia deste trabalho. ....	65
Figura 28 – Dados de pressão com 0,1% de probabilidade de não-excedência no vertedouro LOH I. ....	67
Figura 29 – Esquema representativo do comportamento das pressões mínimas extremas e pontos de aeração. ....	68
Figura 30 – Esquema representativo dos pontos de pressão mínima extrema e pressão constante ao longo da calha do vertedouro, que serão equacionados neste trabalho. ....	70
Figura 31 – Esquema representativo da Região de Fenômeno de Cavitação para pressões mínimas extremas em um vertedouro em degraus, em que $q(1) < q(2)$ . ....	70
Figura 32 – Delimitação do início do escoamento deslizante sobre turbilhões. ....	72
Figura 33 - Delimitação dos pontos de aeração em um vertedouro em degraus. ....	73
Figura 34 - Delimitação da região de dano por cavitação. ....	75
Figura 35 – Regiões de cavitação e de possibilidade de ocorrência de danos em um vertedouro em degraus. ....	77
Figura 36 – Corte transversal em gráfico de regiões de cavitação e possibilidade de danos, em situação de vazão específica constante. ....	78

**Artigo 1 - Determinação dos comprimentos característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões baseados em pressões extremas mínimas em um vertedouro em degraus.**

Figura 1 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ( $P_{e0,1\%}/\gamma$ ) para o modelo LOH I ( $q = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  ou  $F^* = 10,45$ ). .....83

Figura 2 – Representação esquemática do perfil longitudinal e padrão do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus. ....85

Figura 3 – Posições de início de aeração e aeração total no modelo LOH II.....86

Figura 4 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ( $P_{0,1\%}/\gamma$ ) em função de  $L^*$ . ....88

Figura 5 - Posições de início de aeração por determinação visual desconsiderando a extensão da ogiva, menor pressão mínima extrema e aeração total. ....89

Figura 6 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus adimensionalizada.....90

Figura 7 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus adimensionalizada para todos os autores. ....91

Figura 8 - Posição da menor pressão mínima extrema a partir do início dos degraus adimensionalizada.....92

Figura 9 - Posição da menor pressão mínima extrema a partir do início dos degraus adimensionalizada para todos os autores. ....93

Figura 10 - Posição da estabilização das pressões mínimas extremas ou aeração total a partir do início dos degraus ( $L_{en}^*$ ) adimensionalizada. ....94

Figura 11 - Posição da estabilização das pressões mínimas extremas a partir do início dos degraus ( $L_{en}^*$ ) adimensionalizada para todos os autores. ....95

Figura 12 – Comparação entre as retas obtidas através das equações adimensionais de aeração visual inicial, menor pressão mínima extrema e aeração total. ....96

**Artigo 2 - Delimitação de regiões de cavitação em um vertedouro em degraus.**

Figura 1 – Regiões de cavitação e de danos em um vertedouro em degraus. ....107

Figura 2 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 30 \text{ cm}$ ,  $\theta = 45^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09 \text{ m.c.a.}$  .....108

Figura 3 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 60$ cm, $\theta = 45^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	109
Figura 4 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 90$ cm, $\theta = 45^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	109
Figura 5 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 120$ cm, $\theta = 45^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	110
Figura 6 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 30$ cm, $\theta = 53.13^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	110
Figura 7 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 60$ cm, $\theta = 53.13^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	111
Figura 8 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 90$ cm, $\theta = 53.13^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	111
Figura 9 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para $h_d = 120$ cm, $\theta = 53.13^\circ$ e $P_{0,1\%} = -10.09$ m.c.a. ....	112
Figura 10 – Comparação entre curvas de início de aeração visual para diferentes alturas de degraus e mesma inclinação da calha ( $45^\circ$ ). ....	113
Figura 11 – Comparação entre curvas de aeração para diferentes inclinações de calha e mesma altura de degrau ( $h_d = 90$ cm). ....	114
Figura 12 – Comparação entre vazões mínimas para início de cavitação, em função da altura dos degraus e declividade da calha. ....	115
Figura 13 – Comparação entre alturas mínimas de barragens para início de cavitação, em função da altura dos degraus e declividade da calha. ....	116
Figura 14 – Abrangência da região de cavitação com probabilidade de dano ( $\Delta Z$ ) para diferentes alturas de degraus e $q = 30$ m <sup>3</sup> /s/m. ....	117
Figura 15 - Abrangência da região de cavitação com probabilidade de dano ( $\Delta Z$ ) para diferentes declividades de calha e $q = 30$ m <sup>3</sup> /s/m. ....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Volumes de concreto utilizados em reparos de UHEs.....	19
Tabela 2 – Barragens pelo mundo com problemas provocados pelo escoamento a superfícies de concreto. ....	24
Tabela 3 – Equações de diversos autores para determinação da altura da lâmina d'água no ponto de aeração ( $h_a$ ) e a distância a partir da crista do vertedouro até o ponto de incipiência de aeração ( $L_a$ ). ....	34
Tabela 4 – Determinação de pressões e localização de pressões mínimas extremas nos espelhos dos degraus de um vertedouro em degraus.....	42
Tabela 5 – Dimensões e formas de irregularidades superficiais. ....	53
Tabela 6 – Determinação dos coeficientes gerados para a Concentração Média de ar ( $C_s$ ). ....	56
Tabela 7 – Características dos modelos físicos reduzidos utilizados para o trabalho. ....	60
Tabela 8 – Principais características dos transdutores de pressão adicionados nos degraus dos modelos físicos reduzidos. ....	62
Tabela 9 - Resumo das fórmulas utilizadas para a criação do método visual para obtenção das regiões de cavitação em um vertedouro em degraus. ....	76

### **Artigo 1 - Determinação dos comprimentos característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões baseados em pressões extremas mínimas em um vertedouro em degraus.**

Tabela 1– Características dos modelos experimentais utilizados. ....	84
Tabela 2 – Informações dos modelos utilizados pelos autores inseridos na validação .....	87

### **Artigo 2 - Delimitação de regiões de cavitação em um vertedouro em degraus.**

Tabela 1 – Equações propostas para comprimento de calha de um vertedouro em degraus. ....	103
Tabela 2 - Resumo das equações utilizadas.....	105

## LISTA DE SIGLAS

CBDB	Comitê Brasileiro de Barragens
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CESP	Companhia Energética de São Paulo
H	Horizontal
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LAHE	Laboratório de Hidráulica Experimental
LOH I	Modelo físico 1 do Laboratório de Obras Hidráulicas
LOH II	Modelo físico 2 do Laboratório de Obras Hidráulicas
MTES	Modelos teóricos-experimentais de previsão de pressão
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidrelétrica
V	Vertical

## LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Graus Celsius
a, b e c	Coefficientes correspondentes a cada probabilidade de ocorrência
C <sub>s</sub>	Concentração média de ar no escoamento
C, m e n	Coefficientes de irregularidades da superfície
cm	Centímetros
C <sub>p</sub>	Coefficiente de pressões extremas
C <sub>pα</sub>	Coefficiente de pressão médio
Fr	Número de Froude do escoamento
Fr*	Número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha
g	Aceleração gravitacional
h <sub>a</sub>	Altura da lâmina d'água aerada
h <sub>c</sub>	Altura crítica do escoamento
h <sub>d</sub>	Altura de degrau
h <sub>L</sub>	Profundidade do degrau
h <sub>n</sub>	Profundidade uniforme do escoamento
Hz	Hertz
k	Rugosidade dos degraus da calha
L	Comprimento da calha do vertedouro
L <sub>e*0,1%<sub>mín</sub></sub>	Comprimento desde o primeiro degrau até o ponto de menor pressão mínima extrema
L <sub>a</sub>	Comprimento de aeração a partir da crista do Vertedouro
L* <sub>v</sub>	Comprimento de aeração visual inicial, a partir do primeiro degrau da calha
L <sub>en*</sub>	Comprimento de aeração máxima a partir do primeiro degrau
m	Metros
m.c.a.	Metros de coluna de água
m/s	Metros por segundo
m <sup>3</sup>	Metros cúbicos
m <sup>3</sup> /s/m	Metros cúbicos por segundo por metro
MPa	Mega Pascal (10 <sup>6</sup> Newtons por metro quadrado)
N	Número do degrau

$P_a$	Pascal
$P_{ie}/\gamma$	Pressão mínima extrema no primeiro degrau da calha
$P_{med}$	Pressão média
$P_0$	Pressão característica (pressão local + pressão atmosférica)
$P_v$	Pressão de vapor do líquido
$P_{x\%}$	Pressão com x% de probabilidade de não excedência
$P_{0,1\%min}$	Menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência
$q$	Vazão específica do escoamento
$s'$	Posição adimensional com valor 0 no ponto de início da aeração
$v_m$	Velocidade média de escoamento
$\nu$	Viscosidade cinemática
$Y$	Distância da leitura de concentração de ar do fundo do escoamento
$Y_0$	Altura da ogiva do vertedouro
$Y_d$	Altura do primeiro degrau ao degrau determinado
$Z$	Energia total a montante
$Z_{0,1\%min}$	Energia total a montante até o ponto de menor pressão mínima extrema
$Z_i$	Energia total até o primeiro degrau da calha
$\theta$	Ângulo de inclinação da calha do vertedouro
$\gamma$	Peso específico da água
$\rho$	Densidade da água
$\sigma$	Índice de cavitação
$\sigma_{cr}$	Índice de cavitação crítico
$\sigma_i$	Índice de cavitação inicial
$d$	Altura da irregularidade
$\delta$	Espessura da camada limite
$\beta$	Declividade das linhas de corrente
$\Delta Z$	Abrangência da região de cavitação com probabilidade de dano

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>20</b>
2.1	OBJETIVO GERAL .....	20
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
<b>3</b>	<b>ESTRUTURA DO TRABALHO</b> .....	<b>22</b>
<b>4</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>23</b>
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO .....	23
4.2	VERTEDOUROS .....	26
4.3	ESCOAMENTO EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS .....	28
<b>4.3.1</b>	<b>Início de Aeração</b> .....	<b>33</b>
<b>4.3.2</b>	<b>Pressões nos degraus de vertedouros</b> .....	<b>35</b>
4.4	CAVITAÇÃO .....	43
<b>5</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>57</b>
5.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	57
5.2	METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	58
5.3	METODOLOGIA ANALÍTICA.....	63
<b>5.3.1</b>	<b>Localização das pressões críticas em um vertedouro em degraus</b> .....	<b>65</b>
<b>5.3.2</b>	<b>Determinação das Regiões de Cavitação</b> .....	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>79</b>
6.1	DETERMINAÇÃO DOS COMPRIMENTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES BASEADOS EM PRESSÕES EXTREMAS MÍNIMAS EM UM VERTEDOURO EM DEGRAUS .....	80
6.2	DELIMITAÇÃO DE REGIÕES DE CAVITAÇÃO EM UM VERTEDOURO EM DEGRAUS.....	100
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>121</b>



<b>8</b>	<b>RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>123</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>124</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Estruturas extravasoras e dissipadoras de energia, como vertedouros e bacias de dissipação, têm grande importância no estudo de barragens por serem responsáveis pela proteção do barramento, especialmente em situações de excessiva carga hidráulica oriunda de cheias. Essas estruturas, amplamente construídas em concreto, são submetidas a velocidades de escoamento elevadas e, por isso, podem apresentar danos na superfície de concreto, podendo comprometer a segurança do empreendimento e ocasionar acidentes comprometedores.

É de conhecimento dos envolvidos com projeto e construção de obras hidráulicas, a importância das estruturas de concreto, especialmente o sistema de descarga, e os altos custos ligados a elas. Por isso, quando sujeitas a fluxos de alta velocidade devem ser cuidadosamente concebidas e projetadas. Assim, estudos que possam melhorar a eficiência e segurança destas estruturas têm sido cada vez mais explorados.

A construção de vertedouros em barragens e a necessidade de otimizar os custos relacionados a eles originaram novas técnicas que reduziram o volume da estrutura. Com isso, os vertedouros apresentam soleiras deprimidas, com maiores coeficientes de vazão e perfis de calha mais íngremes. Contudo, estas alternativas induzem à ocorrência de pressões negativas na crista e ao longo da calha, fator ligado a ocorrência de cavitação e descolamento da lâmina d'água, que podem resultar na degradação da superfície de concreto. Portanto, torna-se essencial determinar características geométricas e características de escoamentos que limitem a intensidade de pressões negativas a serem assumidas nestes projetos para que não haja danos a estrutura.

Vieira e Gontijo (2011) confirmam que, entre 1990 e 2010, o número de estruturas hidráulicas danificadas por diferentes processos aumentou significativamente. O desgaste na superfície de concreto é provocado, principalmente, por cavitação e tensões de cisalhamento.

A cavitação, considerada o principal fator, ainda é um dos mais complexos de definir e explicar na hidráulica, uma vez que é influenciado por muitas características e, em função das escalas praticadas em estudos experimentais, é difícil observá-lo em laboratório (KORMANN et al., 2001). In loco, pode ser observada pela dificuldade de identificar a direção do fluxo no local erodido, bem como a textura granular formada

na superfície erodida do material (FALVEY, 1990).

Investigações feitas por Galperin (1971) mostram que, para evitar a ocorrência de danos por cavitação na estrutura, a resistência do concreto a ser utilizada deve considerar as velocidades admissíveis e a concentração de ar fornecida pela aeração, onde, com um aumento de concentração de ar no fluxo, há a criação de uma camada de proteção da superfície contra os efeitos de cavitação e, portanto, menor a necessidade de se aumentar a resistência do concreto. Em concordância, Ball (1976) demonstra que a velocidade máxima permitida para a não ocorrência de cavitação depende do tamanho e forma das irregularidades da superfície e que o fenômeno quase desaparece quando a camada de fundo é aerada.

Devido as suas macrorrugosidades e às altas velocidades de escoamento, vertedouros em degraus apresentam pressões extremas negativas capazes de gerar zonas de baixa pressão e, conseqüentemente, ocasionar o fenômeno de cavitação. Por isso, diversos autores se propuseram a estudar as relações de escoamento deste tipo de estrutura que propiciam a ocorrência do fenômeno. Para Gomes (2006), as máximas vazões específicas recomendadas para que os vertedouros em degraus não apresentassem a cavitação ao longo de sua calha estariam em torno de 11,3 m<sup>3</sup>/s/m; para Matos et al. (2000), entre 20 a 30 m<sup>3</sup>/s/m; e para Amador (2005), a cavitação pode ocorrer de forma incipiente para vazões específicas a partir de 11,5 m<sup>3</sup>/s/m, pois a quantidade de ar presente no escoamento é insuficiente para proteger a superfície sólida de danos decorrentes da cavitação.

Para uma melhor compreensão dos danos causados nas estruturas e os motivos pelos quais ocorrem, é necessária uma análise dos parâmetros envolvidos no processo de dano por cavitação sobre o vertedouro em degraus, como a caracterização da geometria da estrutura hidráulica e do escoamento a que é submetida. Busca-se, dessa forma, associar as características impostas pelo escoamento às características geométricas das superfícies hidráulicas adotadas atualmente em obras desse porte para verificar a possibilidade de ocorrência de cavitação.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A realização deste trabalho se justifica na necessidade de ampliação da segurança de barragens, reduzindo os riscos de falha nas estruturas que poderiam ter consequências extremamente prejudiciais às comunidades que habitam regiões a jusante dos empreendimentos e ao meio ambiente. Assim, como sugerido na introdução, a cavitação é capaz de ocasionar danos na superfície de degraus de vertedouros e, portanto, é um fator que merece atenção.

Desta forma, o trabalho oportuniza identificar as características geométricas dos vertedouros em degraus que reduzem ou aumentam a possibilidade de danos por cavitação, aumentando a segurança de operação e a vida útil da estrutura.

Além disso, estudos que aumentem a confiabilidade e diminuam a necessidade de manutenção da estrutura proporcionam maior funcionalidade das UHEs (usinas hidrelétricas) e, portanto, maior geração de energia dentro dos limites hidrológicos e operacionais. Isto resulta em um impacto significativo na receita do empreendimento e no custo final repassado ao consumidor.

Além dos custos operacionais citados, o volume de concreto para reparo nas estruturas é elevado e, portanto, seus custos seguem a mesma lógica. A Tabela 1 apresenta os volumes de concreto necessários para reparos em estruturas que sofreram danos, sejam eles por cavitação ou não. Ainda assim, sabe-se que os custos totais destes reparos não envolvem apenas o volume de concreto, sendo maiores em termos globais.

Tabela 1 – Volumes de concreto utilizados em reparos de UHEs.

UHE	Estrutura danificada	Volume de concreto (m <sup>3</sup> )	Ano
Camargos	Bacia de dissipação	225	1991
Luiz Carlos Barreto de Carvalho	Concha de arremesso	474	1992
Marimbondo	Bacia de dissipação	3.567	1982
Mascarenhas de Moraes	Vertedouro complementar	34.317	2002
Porto Colômbia	Vertedouro e bacia de dissipação	1.358	1994
Três Marias	Vertedouro	14.614	1984

Fonte: adaptado de CBDB (2002).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia de identificação das regiões críticas suscetíveis a danos em calhas de vertedouro em degraus relacionadas ao fenômeno de cavitação, integrando aspectos geométricos e hidráulicos aos critérios de aeração, que garantem a proteção das estruturas de concreto.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos foram delineados:

- a) Explorar a bibliografia acerca do comportamento das pressões em vertedouros em degraus que estão relacionadas ao fenômeno de cavitação;
- b) Identificar e utilizar dados e equações existentes na bibliografia para integrarem e validarem os estudos de pressões dos comprimentos críticos relacionados ao escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus;
- c) Explorar a bibliografia acerca da relação entre a aeração natural do escoamento e os processos cavitantes no fluxo sobre a estrutura em degraus;
- d) Identificar e utilizar dados e equações existentes na bibliografia para integrarem e validarem os estudos de aeração natural do escoamento relacionados ao escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus;
- e) Identificar os comprimentos críticos relacionados às principais posições do escoamento em vertedouros em degraus, a partir do primeiro degrau da calha;
- f) Desenvolver equações que caracterizassem os comprimentos críticos relacionados às principais posições do escoamento em vertedouros em degraus, a partir do primeiro degrau da calha;

- g) Identificar as regiões críticas ao longo da calha de um vertedouro em degraus, considerando condições geométricas, hidráulicas e de aeração de protótipo.

### 3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento do trabalho ocorreu da seguinte maneira:

- a) Referencial Teórico – neste capítulo foram abordados os principais estudos relacionados ao escoamento em vertedouros em degraus, considerando a aeração e as pressões na calha e à cavitação;
- b) Materiais e Métodos – neste capítulo foram abordadas as informações gerais dos modelos físicos utilizados para determinar as pressões mínimas extremas. Além disso, neste capítulo foi abordado com maior precisão a maneira como as análises relacionadas aos comprimentos críticos do escoamento em vertedouros em degraus foram realizadas. Também foram descritos os passos executados para que fosse possível identificar as zonas de cavitação e sua possibilidade de danos em um gráfico;
- c) Resultados – neste capítulo, os resultados obtidos foram apresentados em formato de artigo. Assim, alguns itens já apresentados no capítulo de metodologia são retomados de maneira resumida. Os resultados então foram separados em dois diferentes artigos: “Determinação dos comprimentos característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões baseados em pressões extremas mínimas em um vertedouro em degraus” e “Delimitação de regiões de cavitação em um vertedouro em degraus”.

## 4 REFERENCIAL TEÓRICO

### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

O uso de concreto em barragens iniciou-se ainda no século XIX, devido à grande durabilidade oferecida pelo uso do material, mantendo sua resistência e suportando os processos de deterioração a que estão sujeitas.

Já o uso do concreto compactado a rolo (CCR) ocorreu, pela primeira vez, em Taiwan, por volta da década de 60 (SIMÕES, 2012). Andriollo (1998) relata que a ampla utilização da técnica originou quinze barragens no mundo todo, e que em 1990 já eram 45, em 1993 eram 96 e em 1996, 156. Segundo Dunstan (2003), em 2002 este número chegava a 251. Os dados de 2015 chegam a 650 barragens constituídas de CCR (LEWIS, 2015).

O Brasil possui uma abundante disponibilidade de recursos hídricos e, tanto nas décadas de 70 e 80, com o concreto massa, quanto nas últimas décadas, com o CCR, construiu diversas barragens com diferentes funções, como consumo d'água, controle de cheias e geração de energia. Com isso, o país se tornou referência no planejamento, elaboração de projetos e construção de grandes unidades de aproveitamento hidrelétrico. (ZUCH, 2008)

Apesar disso, em diversos lugares do mundo, incidentes e acidentes devido à erosão hidráulica no concreto são conhecidos. A Tabela 2 demonstra que casos de barragens com danos provocados pelo escoamento são um problema global e vêm desde muitas décadas.

Pode ser observado que a Tabela 2 contém dados antigos de danos ocorridos em barragens devido ao escoamento, estando o último datado em 1990. Isto ocorre devido a segurança e privacidade dos dados dos empreendimentos, impossibilitando a coleta precisa de dados mais recentes.



Tabela 2 – Barragens pelo mundo com problemas provocados pelo escoamento a superfícies de concreto.

Nome do projeto	Ano do ocorrido	Estrutura	Localização	Problema
Barragem Sarrans	1935	Jusante da curva	França	Degradação do concreto
Barragem Lucky Peak	1956	Vertedouro	Idaho	Cavitação
Barragem Terzaghi	1960	Vertedouro	British Columbia	Cavitação
Barragem Grand Coulee	1960	Canal	Washington	Cavitação
Barragem do Lago Noliu	1963	Bacia de dissipação	Keutucgy	Abrasão
Barragem Pomona	1963	Bacia de dissipação	Kansas	Abrasão
Barragem Glen Canyon	1964	Barragem de arco	Arizona	Cavitação
Barragem Palisades	1964	Jusante das comportas	Idaho	Danos
Barragem Kimzua	1965	Bacia de dissipação	Pennsylvania	Abrasão
Barragem Yellowtail Afterbay	1966	Bacia de dissipação	Montana	Cavitação
Barragem Yellowtail	1966	Bacia de dissipação	Montana	Cavitação
Barragem Aldeiadávila	1966	Vertedouro subterrâneo	Portugal	Cavitação
Barragem Tuttle Creek	1967	A jusante da placa de vedação	Colorado	Cavitação
Barragem Keenleyside	1968	Vertedouro	British Columbia	Cavitação
Barragem Lower monumental	1969	Eclusa	Washington	Cavitação
Barragem Red Rock	1969	Bacia de dissipação	Iowa	Abrasão
Barragem Dowrshak	1974	Barragem de gravidade	Idaho	Cavitação
UHE Ilha Solteira	1974	Blocos dissipadores do vertedouro de superfície	Mato Grosso do Sul	Cavitação
UHE Jupia	1976	Interface concreto e tubo blindado	Mato Grosso do Sul	Cavitação
Barragem Tarbela	1977	Vertedouro subterrâneo	Paquistão	Cavitação
Barragem Hoover	1941, 1983	Vertedouro	Colorado	Cavitação
Barragem Espinosa Irrigation	1984	Barragem diversa	New Mexico	Abrasão
UHE Porto Colômbia	1990	Bacia de dissipação	Entre MG e SP	Cavitação e abrasão

Fonte: adaptado de Tatro et al. (1999).

Quando se refere à barragem, fala-se de qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para diferentes objetivos, como confinamento ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o conjunto total de estruturas, não somente o maciço principal, de acordo com a Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. (BRASIL, 2010)

Cada projeto de barragem possui um conjunto de características específicas e por isso se diz que nenhuma barragem é igual à outra. Apesar disso, existem estruturas comuns a todas elas. São compostas, principalmente por: barramento principal, reservatório, vertedouro e bacia de dissipação. Outras estruturas também podem ser observadas em uma barragem, como eclusas, tomadas d'água, dentre outras. No caso de UHEs, apresentam também a casa de forças com turbinas e condutos forçados para a geração de energia elétrica.

Vertedouros, dissipadores de energia, canais de aproximação, canais de fuga e canais de descarga são estruturas extravasoras das barragens. Porém se torna obrigatório apenas o uso dos vertedouros e bacias de dissipação (NOVAK et al., 2007) para garantir a segurança da barragem, escoando de forma controlada as águas excedentes do reservatório. Os sistemas extravasores devem ser dimensionados para a vazão efluente de projeto relacionadas ao amortecimento da onda de cheia, definida por estudos hidrológicos e hidráulicos. A Figura 1 representa um modelo de estrutura hidráulica extravasora com vertedouro em degraus e bacia de dissipação.

Figura 1 – Vertedouro em degraus com bacia de dissipação por ressalto hidráulico.



Fonte: Turella (2010).

As estruturas hidráulicas responsáveis pelo extravasamento do reservatório são submetidas a altas velocidades de escoamento, devido à grande energia potencial acumulada a montante. Conseqüentemente, são os elementos que mais sofrem com danos provocados pela interação da estrutura com o escoamento. Quintela (1980) afirma que o número de aproveitamentos hidráulicos em que a superfície hidráulica de concreto dos elementos de extravasamento sofre danos pela ação de cavitação é

relativamente alto. A Figura 2 demonstra os danos por cavitação em estruturas de concreto.

Figura 2 – Danos por cavitação no vertedouro de concreto na Barragem Kinzua Pennsylvania.



Fonte: Miranda (1966 apud Coutinho, 2005).

## 4.2 VERTEDOUROS

As barragens necessitam de controle do recurso hídrico armazenado, que não pode extravasar pelo barramento principal (*overtopping*), pois poderia causar seu rompimento. Por isso, implantam-se os vertedouros com a função de descarregar em segurança a vazão excedente dos reservatórios sem causar danos ao empreendimento. (BAPTISTA E LARA, 2014)

O tipo e a localização dos vertedouros variam em função das condições geotécnicas, topográficas e arranjos da obra. E podem ser classificados segundo seu material, condições de operação, dentre outros.

A principal classificação a ser feita é referente às condições operacionais, sendo assim de soleira controlada ou de soleira livre. Os vertedouros de soleira controlada são compostos de comportas com soleiras situadas abaixo do nível normal do reservatório que podem controlar a vazão a ser escoada para fora do reservatório. Os vertedouros de soleira livre são compostos de uma soleira elevada com crista com diferentes formatos (tipo Creager, WES etc.) e situada no nível normal de água.

Ainda, o vertedouro pode ser identificado quanto a rugosidade de sua calha, sendo ela lisa ou escalonada. Calhas lisas são canais planos sem interferência de

outros elementos, já os vertedouros com a calha escalonada apresentam degraus ao longo do seu desenvolvimento. Vertedouros com calha em degraus apresentam resistência ao escoamento, proporcionando a dissipação de parte da energia a partir de sua macrorrugosidade. (DAI PRÁ, 2004)

Data-se que a utilização de vertedouros em degraus vem desde 1892 na Barragem de New Croton, nos EUA, com o objetivo de dissipar energia. A partir da década de 70, a técnica de vertedouro em degraus se expandiu devido ao desenvolvimento da tecnologia de CCR, que tornava o processo construtivo mais prático e envolvia menores custos. Tozzi (1992), Sanagiotto (2003) e Simões (2012) descrevem com precisão a trajetória deste tipo de estrutura com o passar dos anos.

Os vertedouros em degraus possuem a vantagem de dissipar parte da energia no decorrer da calha antes de chegar à bacia de dissipação, gerando uma redução nas dimensões das estruturas de dissipação no pé da barragem e, conseqüentemente, reduzindo os custos da obra. Conterato (2014) afirma que diversos fatores são responsáveis pela quantidade de energia dissipada pela estrutura, como a geometria dos degraus, a declividade da calha, o tipo de escoamento e sua aeração.

Consistem, basicamente, em uma crista padrão em concreto convencional e definida a partir da cheia de projeto, uma zona de transição com diferentes e crescentes alturas de degraus e o canal rápido, também denominado paramento de jusante, composto por degraus de altura constante com inclinação correspondente a inclinação da calha (SIMÕES, 2012), como demonstrado na Figura 3.

Figura 3 – Vertedouro em degraus da Barragem de Dona Francisca, no Rio Grande do Sul.

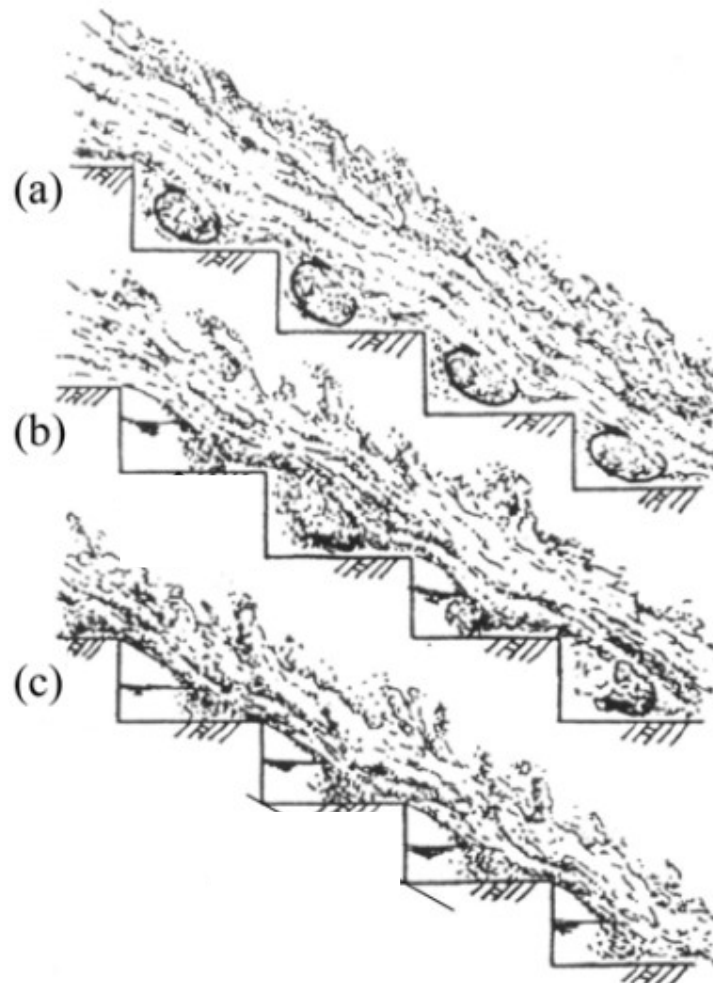


Fonte: elaborada pela autora (2016).

#### 4.3 ESCOAMENTO EM VERTEDOUROS EM DEGRAUS

Matos e Quintela (1995) apresentaram em seus estudos dois diferentes tipos de regimes de escoamento sobre o paramento de vertedouro em degraus, que são: escoamento em quedas sucessivas e escoamento deslizante sobre turbilhões. Ohtsu e Yasuda (1997) incorporaram o escoamento de transição (DAI PRÁ, 2004). A Figura 4 apresenta, resumidamente, os três tipos de escoamento.

Figura 4 – Desenhos esquemáticos dos três regimes de escoamento (a- deslizante sobre turbilhões, b – transição, c – quedas sucessivas).



Fonte: Ohtsu et al. (2001).

O escoamento por quedas sucessivas ocorre em estruturas escalonadas de reduzidas declividade e vazão. De acordo com Chanson (2002), o escoamento caracteriza-se pelas quedas do fluxo d'água de um degrau anterior diretamente sobre o patamar do degrau a jusante. A dissipação de energia ocorre pela dispersão do fluxo no ar, pelo impacto do mesmo no patamar e/ou devido a formação dos ressaltos hidráulicos nos degraus.

O escoamento de transição ocorre quando há instabilidade para definir o tipo de escoamento que está ocorrendo, ou seja, é definido pela transição entre o escoamento por quedas sucessivas para o escoamento deslizante sobre turbilhões.

Já o escoamento deslizante sobre turbilhões acontece em canais em degraus com inclinação e vazões superiores. Observa-se a formação de turbilhões entre os degraus e não são observadas cavidades de ar nos mesmos. Os turbilhões que se formam pela recirculação do fluido nos vértices internos dos degraus funcionam como pseudofundo para o escoamento principal. Este pseudofundo se mantém pela troca de quantidade de movimento entre o escoamento principal e a energia os turbilhões, ocasionando a dissipação da energia. (CHANSON, 2002)

Para Pegram et al. (1999), a característica marcante do escoamento deslizante sobre turbilhões é o grande volume de aeração, em que o fluxo ocorre, praticamente, sem tocar nos degraus em um fenômeno irregular, ou seja, a ondulação da superfície não corresponde à geometria dos degraus.

O escoamento deslizante sobre turbilhões é o mais utilizado em grandes obras hidráulicas como os vertedouros em degraus, devido às altas vazões e, por isso, é o objeto de estudo desta pesquisa. Pode-se visualizar o escoamento deslizante sobre turbilhões na Figura 5.

Figura 5 – Vertedouro em degraus em funcionamento submetido a escoamento deslizante sobre turbilhões – Barragem Opuha, Nova Zelândia.



Fonte: Gonzalez e Chanson (2006).

Chanson (1994c), com base nos dados obtidos por Essery e Horner (1978), Peyras et al. (1992) e Beitz e Lawless (1992), concluiu que o escoamento deslizante sobre turbilhões, para  $0,2 \leq h_d / h_L \leq 1,25$ , ocorre quando:

$$\frac{h_c}{h_d} = 1,057 - 0,465 \left( \frac{h_d}{h_L} \right) \quad (1)$$

Em que,

$h_c$  é a altura crítica do escoamento (m), dado por  $\sqrt[3]{q^2/g}$ , onde

$q$  é a vazão específica do escoamento ( $m^3/s/m$ );

$g$  é a aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );

$h_d$  é a altura do degrau (m); e

$h_L$  é profundidade do degrau (m).

Ainda, em 1996, Chanson propôs a Equação 2, considerando que o escoamento deslizante sobre turbilhões ocorre quando as cavidades de ar entre os degraus estão completamente preenchidas com água. Assim, adicionou o número de Froude do escoamento à equação:

$$\frac{h_c}{h_d} = \frac{F_r^{2/3} \sqrt{1 + \frac{1}{F_r^2}}}{\sqrt{1 + 2F_r^2 \left(1 + \frac{1}{F_r^2}\right)^{3/2} \left(1 - \frac{\cos(\beta)}{\sqrt{1 + \frac{1}{F_r^2}}}\right)}} \quad (2)$$

Onde,

$Fr$  é o número de Froude do escoamento; e

$\beta$  é a declividade das linhas de corrente.

Fael e Pinheiro (2003) também criaram uma relação empírica (Equação 3) para o início do escoamento deslizante sobre turbilhões a partir dos dados de Ohtsu e Yasuda (1997), Matos (1999) e Fael (2000):

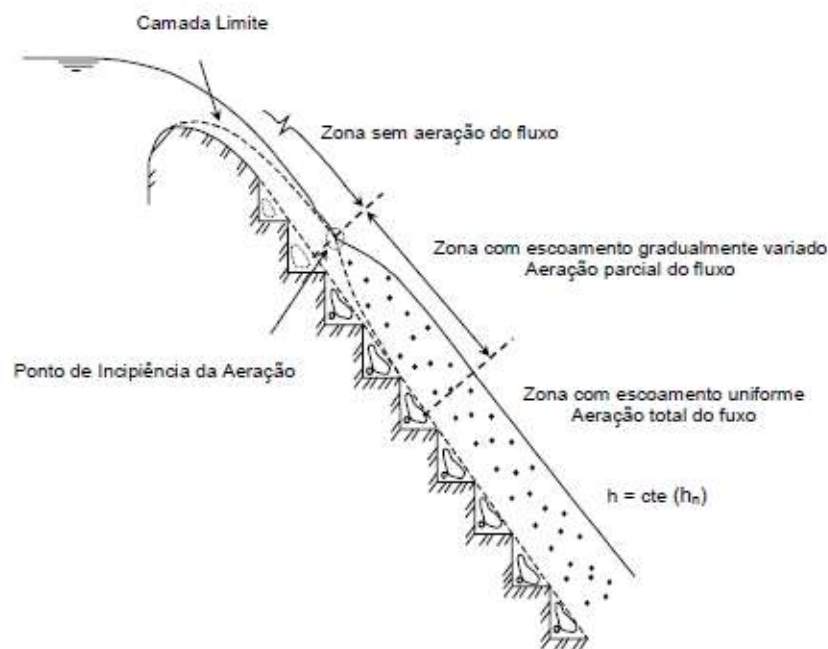
$$\frac{h_c}{h_d} = 0,824 \left( \frac{h_d}{h_L} \right)^{-0,227} \quad (3)$$



A fim de segmentar as diferentes regiões apresentadas no escoamento deslizante sobre turbilhões, Chanson (1994c) delimita três regiões ao longo da calha escalonada, que são observadas na Figura 6:

- a) Zona sem aeração do fluxo: ocorre no início do escoamento sobre a calha, no interior de onde se encontra a camada limite que se estende até atingir a superfície livre, onde começa o processo de aeração natural do escoamento;
- b) Zona de escoamento gradualmente variado: caracteriza-se pelo escoamento aerado, mas com variação na concentração de ar conforme se desloca;
- c) Zona de escoamento uniforme: define-se como a região em que a profundidade da lâmina, a concentração de ar e a distribuição de velocidade são constantes, para uma mesma vazão. É nesta zona em que se verifica a profundidade uniforme do escoamento ( $h_n$ ).

Figura 6 – Regiões do escoamento ao longo de um vertedouro em degraus com regime de escoamento deslizantes.

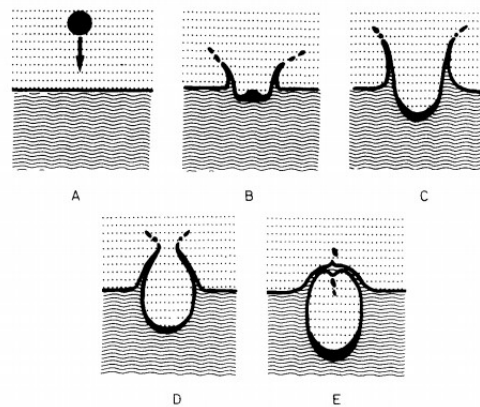


Fonte: Chanson (1994c).

### 4.3.1 Início de Aeração

A formação de aeração ocorre a partir do carregamento de bolhas de ar para dentro da água, no percurso do escoamento, quando a altura da lâmina d'água criada cresce em conjunto à agitação do escoamento (Figura 7). Apesar disso, o desenvolvimento do fenômeno depende da combinação de suficientes vazão e comprimento de calha. Assim, diz-se que quanto maior a vazão escoada, maior deverá ser o comprimento da calha em degraus para que a camada limite possa chegar à superfície livre do escoamento. (VOLKART, 1980)

Figura 7 – Formação de bolha de ar arrastada pelas gotas de água lançadas para fora do fluxo.



Fonte: Volkart (1980).

Existem diversos estudos de diferentes autores que determinam o local e a espessura da lâmina d'água no ponto de início de aeração. Na Tabela 3 são visualizadas estas equações.

Tabela 3 – Equações de diversos autores para determinação da altura da lâmina d'água no ponto de aeração ( $h_a$ ) e a distância a partir da crista do vertedouro até o ponto de incipiência de aeração ( $L_a$ ).

Autores	Equações Propostas		Número das Equações
	Comprimento de aeração	Altura da lâmina d'água	
Wood et al. (1983)	$\frac{L_a}{K} = 613,6 (\text{sen } \alpha)^{0,0796}$		(4)
Chanson (1994a)	$\frac{L_a}{K} = 9,8 (\text{sen } \alpha)^{0,08} * Fr^{*0,71}$	$\frac{h_a}{K} = \frac{0,40}{(\text{sen } \theta)^{0,04}} Fr^{*0,64}$	(5 e (6)
Matos (1999)	$\frac{L_a}{K} = 6,289 * Fr^{*0,734}$	$\frac{h_a}{K} = 0,361 * Fr^{*0,606}$	(7) e (8)
Sanagiotto (2003)	$\frac{L_a}{K} = 9,7721 * Fr^{*0,7014}$	$\frac{h_a}{K} = 0,361 * Fr^{*0,606}$	(9) e (10)
Amador (2005)	$\frac{L_a}{K} = 5,982 * Fr^{*0,840}$	$\frac{h_a}{K} = 0,385 * Fr^{*0,580}$	(11) e (12)
Conterato (2011)	$\frac{L_a}{K} = 12 * Fr^{*2/3}$	$\frac{h_a}{K} = \frac{1}{3} * Fr^{*2/3}$	(13) e (14)
Meiros et al. (2012)	$\frac{L_a}{K} = 6,75 * Fr^{*0,76}$	$\frac{h_a}{K} = 0,35 * Fr^{*0,59}$	(15) e (16)

Fonte: adaptado de Conterato (2014).

Onde,

$\theta$  é o ângulo de inclinação da calha do vertedouro ( $^\circ$ );

$k$  é a rugosidade da calha (m); e

$Fr^*$  é o número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha, dado por

$$Fr^* = \frac{q}{\sqrt{g \cdot k^3 \cdot \text{sen } \theta}}$$

Canellas (2020) observou que o comprimento da ogiva pode interferir na determinação precisa do ponto de início de aeração, por isso utilizou seus resultados obtidos para desenvolver uma metodologia que desconsiderasse esta interferência. Assim, diferentemente dos estudos apresentados na Tabela 3, Canellas (2020) apresentou a Equação 17, considerando o comprimento de aeração a partir do primeiro degrau de interferência:

$$\frac{L_v^*}{k} = 2,8037F_r^* - 1,1378 \quad (17)$$

Onde,

$L_v^*$  é o comprimento de aeração visual inicial, a partir do primeiro degrau da calha (m);

#### 4.3.2 Pressões nos degraus de vertedouros

As pressões localizadas no contato entre o escoamento e a superfície hidráulica de um vertedouro estão intrinsecamente ligadas às erosões provocadas no concreto. Diversos autores, como Sánchez-Juny (2001), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Gomes (2006), Osmar (2016), Novakoski et al. (2018) e Canellas (2020) buscaram caracterizar o desenvolvimento destas pressões ao longo da calha para minimizar e até eliminar os problemas provocados pelo fenômeno.

Sanchez-Juny (2001) desenvolveu sua pesquisa em um modelo físico reduzido bidimensional de um vertedouro com paramento em degraus com 10 cm de espelho e 8 cm de patamar e vazões específicas de até 0,333 m<sup>3</sup>/s/m. O autor concluiu que, ao identificar o escoamento em regime constante foram obtidos quatro dados de pressões semelhantes em posições distintas na calha, mas simétricas em relação ao eixo central, o que garante a bidimensionalidade do fenômeno. Além disso, afirmou que, para os patamares, os valores de pressão são maiores antes da aeração e, ao ter o escoamento aerado, as pressões caem até atingir o equilíbrio. No espelho dos degraus, o fenômeno se repete com pressões ainda menores, devido à separação do escoamento.

Chanson (2002) afirma que os esforços hidrodinâmicos a que os degraus estão submetidos têm grande importância para a definição de metodologias seguras para projetos de calhas em degraus. Diz ainda que os maiores esforços ocorrem na posição de impacto do jato com o piso, sob o ressalto hidráulico e na face vertical quando a cavidade de ar não estiver devidamente ventilada.

Sanagiotto (2003) realizou estudos em modelos físicos reduzidos de três vertedouros em degraus com alturas de degraus de 3, 6 e 9 cm, assim como de uma calha lisa. Nos patamares, concluiu que as pressões médias foram predominantemente positivas e, quanto maior a altura do degrau, maiores as

pressões. Também concluiu que as pressões médias máximas e mínimas situam-se, geralmente, próximas às quinas dos degraus, sendo as máximas no patamar e as mínimas no espelho.

Dai Prá (2004) pesquisou o tema utilizando um modelo físico reduzido bidimensional de vertedouro em degraus com declividade de 45° e degraus de 3, 6 e 9 cm de altura, além da calha lisa. Os dados de pressões foram obtidos com tomadas que iam desde o vértice superior do espelho do degrau até o vértice extremo do patamar do degrau. Observou que os valores máximos de pressões médias foram verificados no vértice junto ao patamar, onde deve ocorrer o maior impacto do fluxo. Já os valores mínimos de pressões médias situam-se mais próximas ao vértice externo do espelho. Isso evidencia a presença de esforços de tração ou arrancamento no espelho do degrau.

Gomes (2006) analisou as pressões médias, flutuações de pressão e pressões extremas em uma calha com inclinação de 1V:0,75H, em que as condições de alturas e medições se assemelham às de Sanagiotto (2003). Concluiu que as pressões negativas registradas, caso os modelos utilizados fossem transpostos para protótipo em escalas de 10 a 15 vezes, oferecem elevados riscos para a incidência à cavitação. Ainda, ligou esta informação à separação da camada limite nas extremidades externas dos espelhos. Também desenvolveu modelos teórico-experimentais que buscam prever as pressões nos degraus. As Figura 8 e Figura 9 apresentam os resultados que o autor obteve, os modelos criados para determinação do coeficiente de pressões extremas ( $C_p$ ) e a posição adimensional ao longo da calha com zero em ponto de início de aeração ( $s'$ , dado por  $\frac{L-La}{ha}$ ), tanto nos patamares quanto nos espelhos dos degraus.

Os gráficos do autor foram obtidos através das equações de adimensionalização das pressões proposta por Amador (2005) e da posição ao longo da calha proposta por Matos (1999), representadas, respectivamente pelas Equações 18 e 19:

$$C_{p\alpha} = \frac{P_{x\%}}{\frac{v_m^2}{2g}} \quad (18)$$

$$s' = \frac{(L - L_a)}{h_a} \quad (19)$$

Onde,

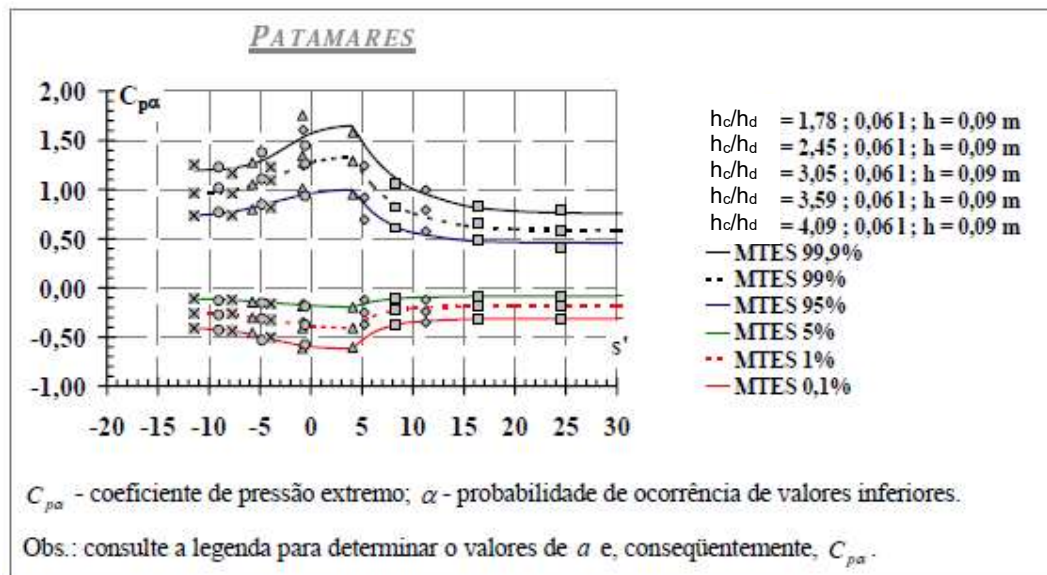
$C_{p\alpha}$  é o coeficiente de pressão médio;

$P_{x\%}$  é a pressão com probabilidade x de não excedência;

L é o comprimento da calha escalonada (m); e

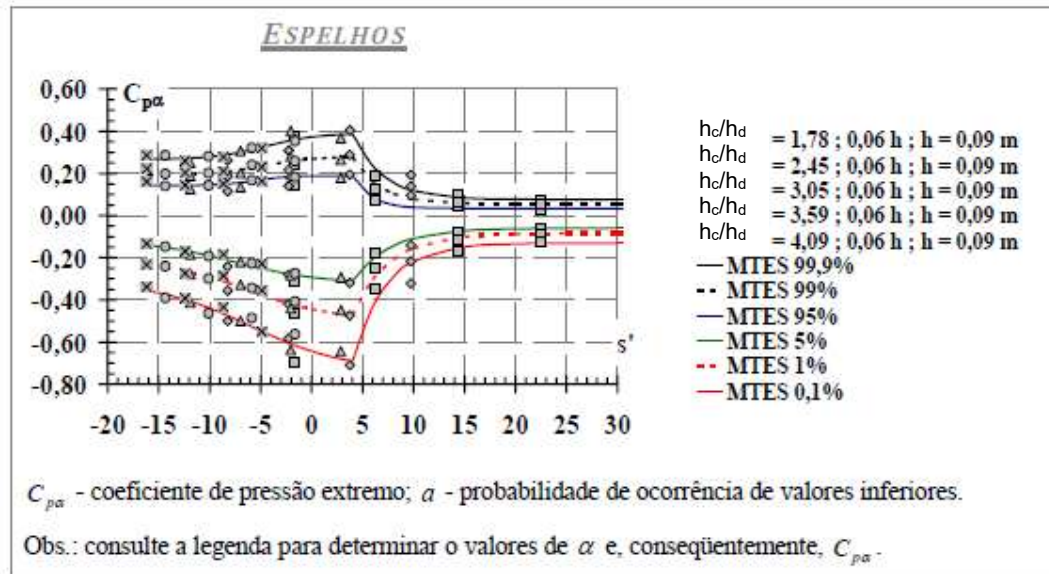
$v_m$  é a velocidade média do escoamento (m/s).

Figura 8 – Resultados de dados obtidos e modelos desenvolvidos por Gomes (2006) para determinar coeficiente de pressão extrema no patamar ao longo da calha (MTES – modelos teórico-experimentais de previsão de pressão).



Fonte: Gomes (2006).

Figura 9 – Resultados de dados obtidos e modelos desenvolvidos por Gomes (2006) para determinar coeficiente de pressão extrema no espelho ao longo da calha.

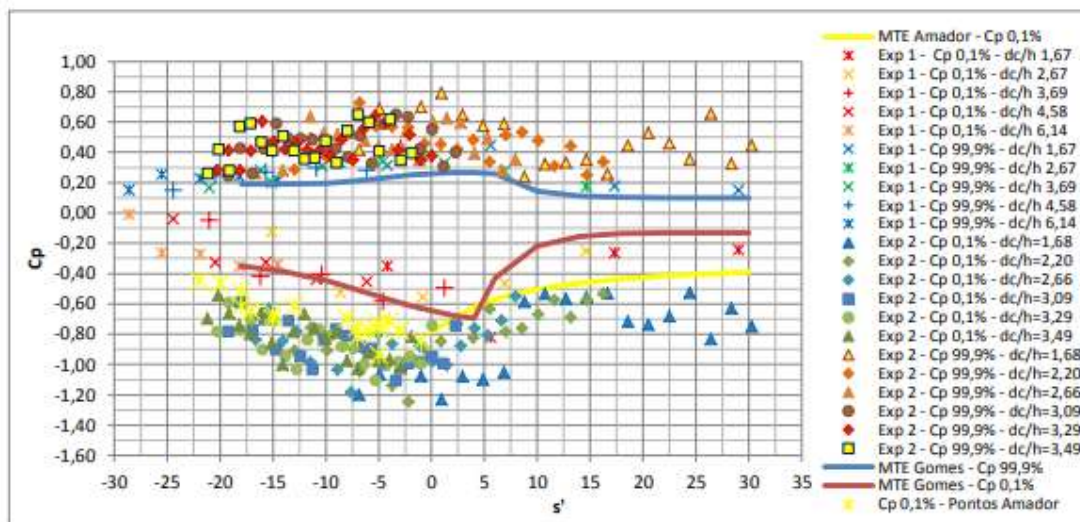


Fonte: Gomes (2006).

Osmar (2016) estudou o desenvolvimento das pressões extremas na calha em degraus através dos dados disponibilizados por Sanagiotto (2003) e Conterato (2011). O modelo de Conterato (2011) também tem inclinação de 1V:0,75H, porém apresenta apenas degraus de 6 cm de altura. Concluiu que os valores máximos de  $C_p$  com 99,9% de probabilidade de não-excedência ocorreram no início da calha, diminuindo ao longo do escoamento. Já as pressões mínimas (com 0,1% de probabilidade de não excedência) tiveram  $C_p$  mais intensas no trecho não aerado. Isto se confirma também nos estudos de Amador (2005) e Gomes (2006).

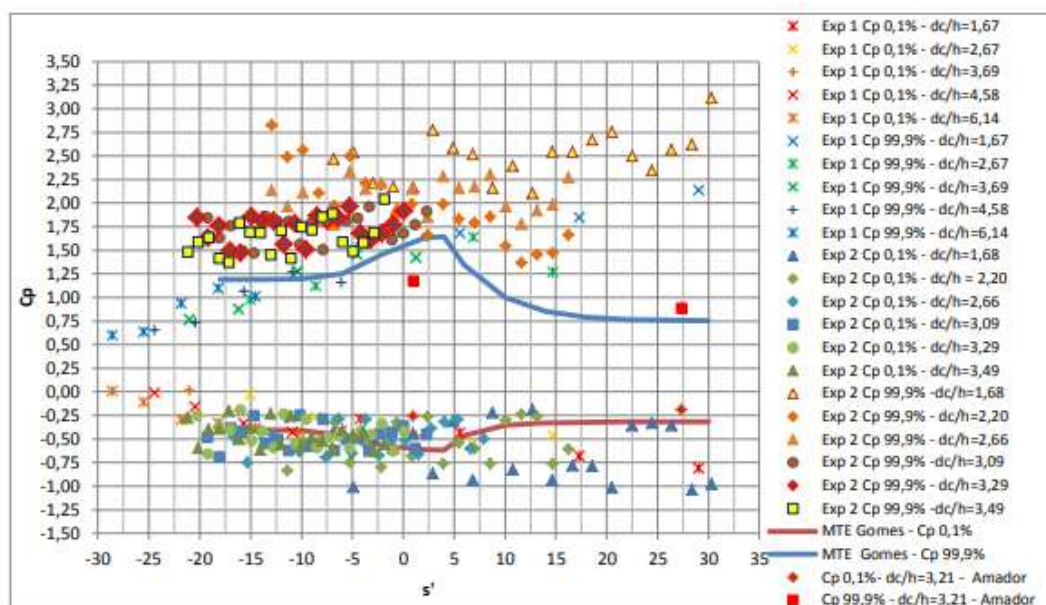
Além disso, Osmar (2016) afirmou que nos patamares, tanto os valores máximos quanto os valores mínimos, ocorreram no final da calha. Pôde-se observar também que os valores mais extremos de  $C_p$  99,9% ocorrem nos patamares e os mais extremos  $C_p$  0,1% nos espelhos. As Figura 10 e Figura 11 apresentam o coeficiente de pressões extremas elaborado em função da posição na calha obtidos pelo autor e comparados a outros autores.

Figura 10 – Coeficiente de pressões extremas nos espelhos dos degraus.



Fonte: Osmar (2016).

Figura 11 - Coeficiente de pressões extremas nos patamares dos degraus.

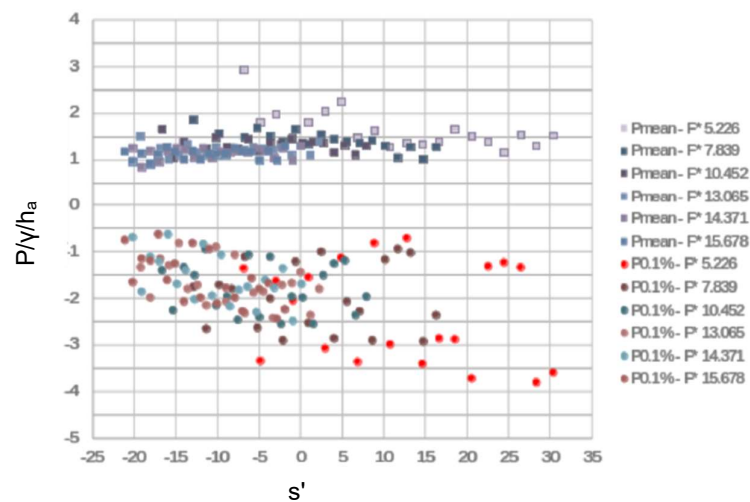


Fonte: Osmar (2016).

Novakoski et al. (2018) observou os dados de pressão mínima com probabilidade de 0,1% de não-excedência no patamar (Figura 12) e no espelho (Figura 13) de vertedouros em degraus e verificou que as menores pressões e com comportamentos semelhantes ocorrem junto à face vertical do degrau.

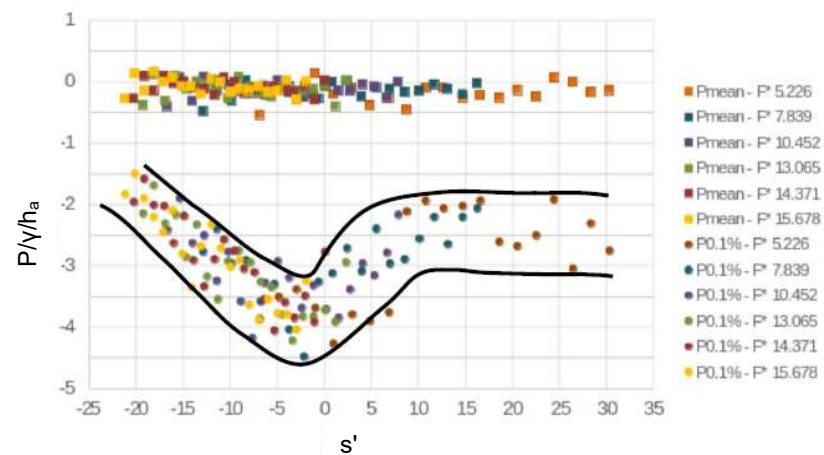


Figura 12 – Pressões médias e extremas nos patamares dos degraus da calha do vertedouro ( $\gamma$  – peso específico da água).



Fonte: adaptado de Novakoski et al. (2018).

Figura 13 - Pressões médias e extremas nos espelhos dos degraus da calha do vertedouro.



Fonte: adaptado de Novakoski et al. (2018).

Canellas (2020) analisou as pressões extremas máximas e mínimas no patamar e no espelho dos degraus de três modelos de vertedouros e observou o comportamento semelhante no desenvolvimento de pressões ao longo da calha.

A autora observou que as pressões extremas mínimas localizadas nas quinhas dos espelhos dos degraus apresentam três pontos característicos do escoamento:

ponto de início da influência do degrau, de mínima pressão extrema e de pressão extrema uniforme.

Já no patamar, Canellas (2020) observou o comportamento semelhante para dois pontos característicos: início da influência do degrau no escoamento e o ponto onde ocorre a máxima pressão extrema.

Canellas (2020) observou também que, no espelho dos degraus, a posição de início de aeração visual ocorre ligeiramente após a menor pressão mínima extrema. Gomes (2006) e Osmar (2016) já haviam afirmado que, nas regiões próximas ao afloramento da camada limite foram registradas as maiores e as menores pressões desenvolvidas ao longo da calha.

Baseada nesta constatação, Canellas (2020) determinou os valores de pressões e as posições destes pontos característicos. Na Tabela 4 são observadas as equações obtidas pela autora para determinar os 3 pontos característicos propostos nos espelhos dos degraus do vertedouro. Canellas (2020) também determinou equações dos pontos característicos do patamar, que podem ser localizadas em seu trabalho. No entanto, neste trabalho, considerando que o processo de cavitação ocorre em pressões mínimas extremas e que estas pressões ocorrem no espelho do degrau, serão apresentadas apenas os pontos característicos do espelho.

Tabela 4 – Determinação de pressões e localização de pressões mínimas extremas nos espelhos dos degraus de um vertedouro em degraus.

	Adimensional de pressão	Adimensional de Localização	Número das Equações
Início dos degraus	$\frac{\left(\frac{P_{ie}}{\gamma}\right) h_d}{Z_i h_c} = -0,0437 - \frac{1,3426}{F_r^*}$	-	(20)
Menor pressão extrema mínima	Para $1,71 < F_r^* \leq 24$ $\frac{\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(F_r^*) - 0,5664$	$\frac{L_{e0,1\%min}^*}{k} = 2,3523 F_r^* - 1,6623$	(21) (22) (23)
	Para $F_r^* > 24$ $\frac{\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = -0,058$		
Pressão extrema mínima constante	$\frac{P_{n0,1\%}}{\gamma h_c} = -1,63$	$\frac{L_{en}^*}{k} = 4,0231 F_r^* + 0,9448$	(24) e (25)

Fonte: adaptado de Canellas (2020).

Onde,

$P_{ie}/\gamma$  – pressão mínima extrema no espelho do primeiro degrau da calha (m.c.a.);

$Z_i$  – energia total até o primeiro degrau da calha;

$P_{0,1\%min}/\gamma$  – menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não-excedência (m.c.a.);

$P_{n0,1\%}/\gamma$  - pressão extrema mínima constante;

$L_{e0,1\%min}^*$  - comprimento até ponto de menor pressão mínima extrema desde o primeiro degrau (m); e

$L_{en}^*$  - comprimento de aeração máxima desde o primeiro degrau da calha (m);

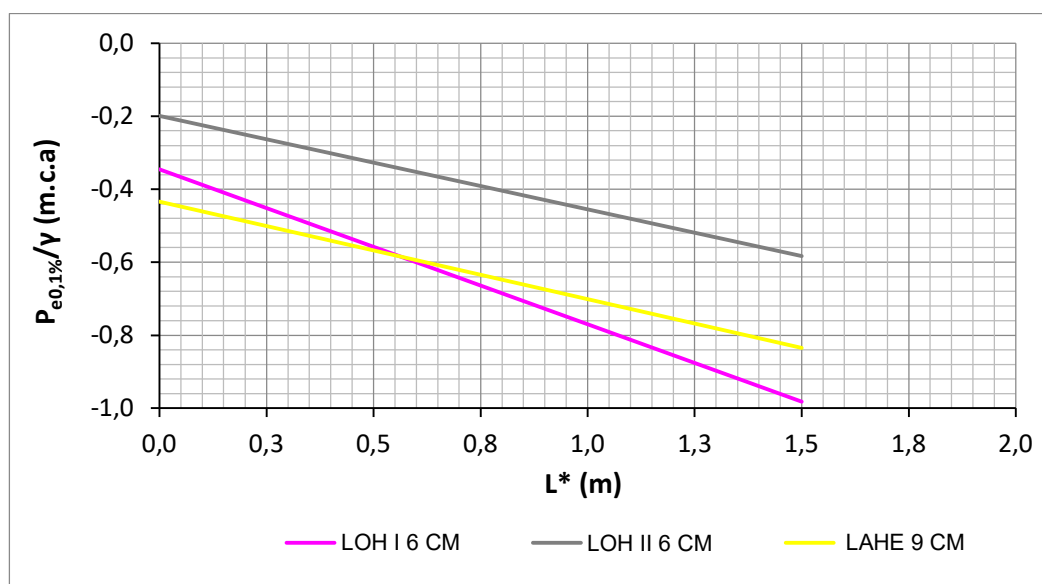
$Z_{0,1\%min}$  – energia total a montante até o ponto de menor pressão mínima extrema (m), dado por  $1,5h_c + Y_d + Y_0$ ; em que

$Y_d$  – altura do primeiro degrau até o degrau determinado (m); e

$Y_0$  – altura da ogiva (m).

Para as pressões mínimas extremas observadas no espelho dos degraus, Canellas (2020) identificou que os valores das pressões extremas mínimas com 0,1% de probabilidade de não excedência ( $P_{0,1\%}$ ) decaíram com o aumento da vazão em uma declividade constante até que atingissem seu extremo (Figura 14). Os decaimentos de pressão observados são parecidos nos modelos com ogivas iguais. As pequenas diferenças apresentadas foram associadas às alturas de degraus diferentes. Já modelos com ogivas diferentes e alturas de degraus iguais apresentaram inclinações de retas semelhantes, mas com pressões superiores às pressões observadas em ogivas maiores. A autora associou ao fato de que diferentes degraus proporcionam diferentes energias em uma mesma posição na calha ( $L^*$ ), onde cada reta está associada a um modelo físico diferente.

Figura 14 - Comparativo do decaimento dos valores de pressão extremas mínimas no espelho.



Fonte: Canellas (2020).

#### 4.4 CAVITAÇÃO

A cavitação foi constatada a partir da formação de cavidades durante o funcionamento de hélices marítimas em embarcações pelo engenheiro Nornand, descrevendo o fenômeno em sua obra “Memória à Academia das Ciências” no século XIX. O processo foi estudado também por Froude e Parsons nesta mesma época, em

que descreveram condições físicas semelhantes à Nornand. Ainda assim, no século XVIII, Euler já havia estudado a cavitação em máquinas hidráulicas. Além desses, destacam-se Moody, Thoma, Tenot, Roger, Fötting e Ackret como principais desenvolvedores dos primeiros estudos relacionados ao desgaste das estruturas por cavitação. (LOPES, 1944).

O termo cavitação provém do latim “*cavus*”, que significa cavidade, já que as bolhas de ar formadas pelas diferenças de pressão e velocidade no escoamento se aderem localmente através dessas cavidades, gerando então o dano por cavitação (KEMPKA, 2014).

O fenômeno ainda é um dos mais complexos de definir e explicar na hidráulica, uma vez que é influenciado por muitas características e, em função da escala, é difícil observá-lo em laboratório (KORMANN et al., 2001). In loco, pode ser observado pela textura granular formada na superfície erodida e pela inexistência de um direcionamento da linha de fluxo. (FALVEY, 1990).

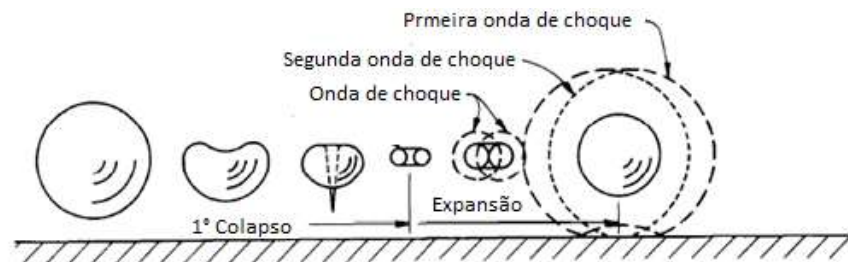
Pode-se definir cavitação como o fenômeno hidráulico em que há formação de bolhas de vapor no líquido devido à redução de pressões do fluido até um valor crítico, sem que haja mudança de temperatura no líquido. Quando a pressão absoluta atinge a pressão de vaporização do líquido, ocorre a formação de bolhas de vapor, localizadas, principalmente, em regiões com pouco oxigênio. As bolhas de vapor formadas são carregadas junto ao escoamento e, ao atingirem zonas de alta pressão pelo aumento da velocidade do fluxo ou irregularidades na superfície, entram em colapso. (KEMPKA, 2014)

O fenômeno ocorre quando a pressão local se iguala à pressão de vapor, ou seja, atinge -10,09 m.c.a., para água pura a 20°C no nível do mar. (Novakoski et al., 2018)

May (1987) enumera três tipos de ocorrência de cavitação principais na engenharia civil, que são as cavitações itinerante, fixa e em vórtice. A cavitação itinerante refere-se a cavidades formadas em zonas de baixa pressão, deslocando-se com o fluxo e colapsando em regiões de maior pressão. A cavitação fixa é aquela em que as bolhas se separam do fluxo e formam uma espécie de limite entre o escoamento e a superfície hidráulica e se estendem ao longo de toda a estrutura, sendo conhecida, também, como super-cavitação. E, por fim, a cavitação em vórtice, definida pela formação de cavidades no núcleo de vórtices de rápida rotação em regiões de alto cisalhamento.

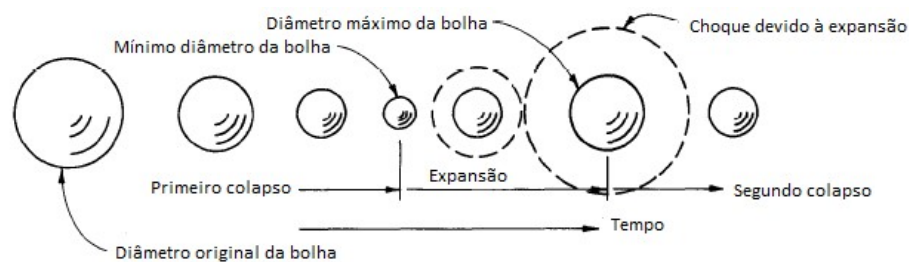
Falvey (1990) explica que o colapso pode ocorrer de diversas formas, dependendo do local onde a bolha estiver. A bolha sofre uma deformação do lado oposto à superfície quando estiver próxima a ela, onde um microjato penetra a bolha no sentido de deformar a superfície e transformando-a em uma toróide. A alta velocidade imposta ao toróide a partir do microjato, ao incidir sobre a superfície hidráulica, provoca danos. Após, o toróide volta ao formato de bolha e pode voltar a entrar em colapso (Figura 15). Em outros casos, onde a bolha está mais afastada da superfície, o colapso ocorre na redução do diâmetro da bolha até atingir um valor muito pequeno e expandir logo depois, processo este que causa ondas de choque que podem atingir a superfície e causar danos (Figura 16). Esse processo pode ocorrer por várias vezes.

Figura 15 – Colapso de uma bolha de vapor próxima a uma superfície.



Fonte: adaptado de Falvey (1990).

Figura 16 – Colapso de uma bolha de vapor distante da superfície.



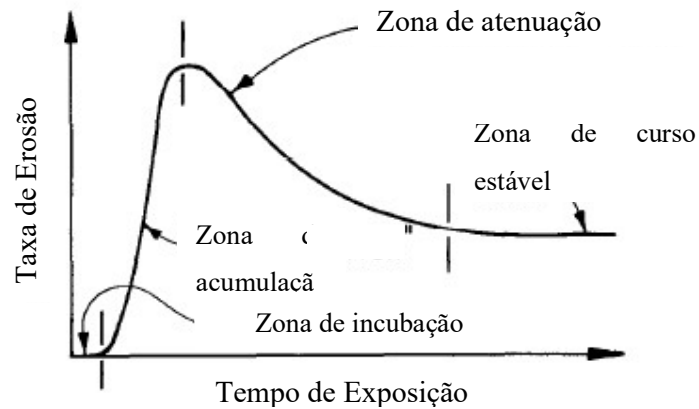
Fonte: adaptado de Falvey (1990).

Tomita e Shima (1986) acrescentam aos estudos de Falvey (1990) um terceiro tipo e mais danoso mecanismo de cavitação, conhecido como ultrajatos. Esses jatos são formados quando as ondas de choque de uma grande bolha desencadeiam um

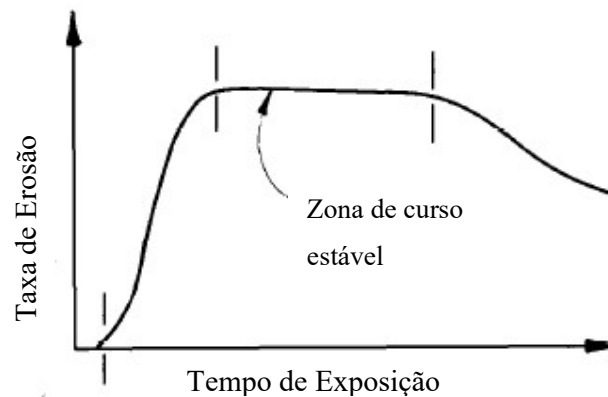
colapso assimétrico, muito repentino, de bolhas menores. Nos experimentos, foi descoberto que os danos da cavitação provocados pelos ultrajatos causaram um impacto de velocidade em cerca de 370 m/s comparado com os 130 m/s de microjatos.

Heyman (1967) indica que a taxa de erosão por cavitação não é constante no tempo e que pode ser determinada de diferentes formas. De acordo com Thiruvengadam (1964), possui quatro diferentes estágios (Figura 17 a). A Zona de Incubação ocorre sem a perda de material e, conforme aumenta o tempo de exposição, a taxa de dano cresce rapidamente, sendo conhecida como Zona de Acumulação, até chegar ao seu limite extremo. A partir disso, a taxa de erosão diminui (Zona de Atenuação) até estabilizar-se na Zona de Curso Estável. Já de acordo com Plesset e Devine (1963), o dano por cavitação cresce rapidamente, estabiliza, na Zona de Curso Estável e então diminui em um ritmo lento (Figura 17 b).

Figura 17 – Alcance de dano por cavitação.



b. Características de acordo com Thiruvengadam (1964)



a. Características de acordo com Plesset e Devine (1963)

Fonte: adaptado de Heyman (1967).

Tullis (1982) propõe três estágios durante o processo de cavitação:

- Cavitação incipiente: início da existência de cavitação. Uma vez que não se pode separar precisamente o ponto de inepção de cavitação do ponto sem a presença do fenômeno. Os efeitos sonoros provocados neste estágio caracterizam-se por estouros leves e intermitentes. O ruído é distinto ao do escoamento;
- Cavitação crítica: cavitação estacionária, sem causar danos à estrutura. Produz ruído leve e estacionário;
- Cavitação de bloqueio: grande intensidade de cavitação (valendo-se de ruído e vibração), atingindo a intensidade de pico. A lâmina d'água do escoamento nesta região é instável.



Estudos comprovam que se pode prever quais pressões e velocidades devem desencadear o fenômeno através do índice de cavitação, atentando para as condições de vazão, tempo de exposição e materiais de construção. Segundo Falvey (1990), quanto menor o índice de cavitação calculado, mais crítico se torna o problema. Por isso, foi indicado por diversos autores o índice de cavitação crítico, que corresponde a condições hidráulicas limites para a ocorrência de cavitação. Sendo assim, valores de índice de cavitação inferiores ao  $\sigma_{cr}$  (índice de cavitação crítico = 0,25) indicam risco de cavitação. O índice de cavitação ( $\sigma$ ), geralmente, é calculado pela Equação 26.

$$\sigma = \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2} \rho v_m^2} \quad (26)$$

Onde,

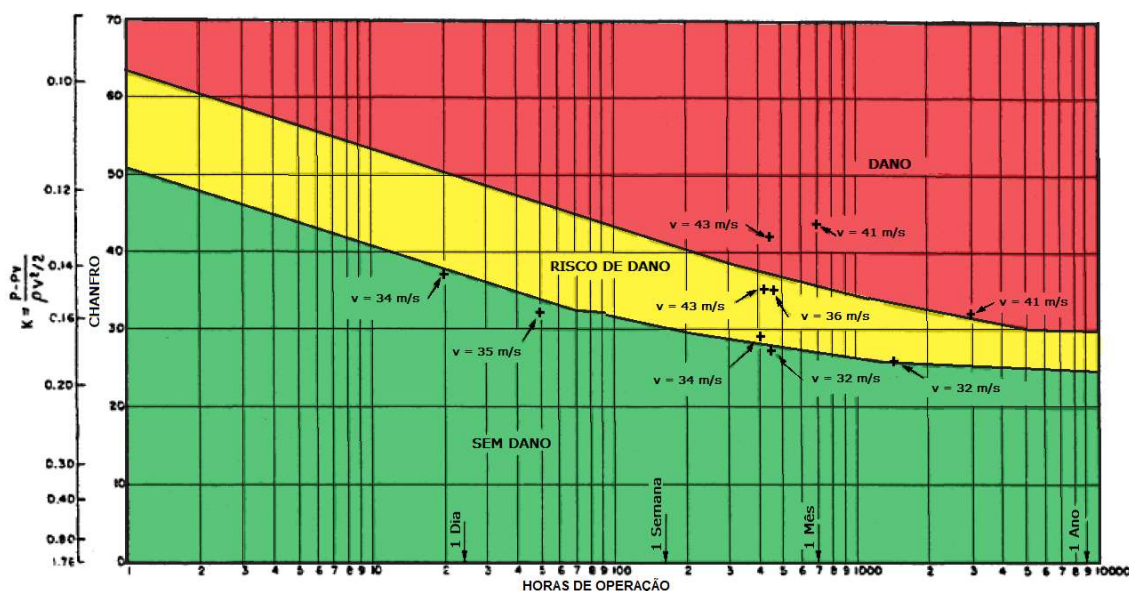
$P_0$  é a pressão característica (pressão local + pressão atmosférica) (m.c.a.);

$P_v$  é a pressão de vapor do líquido (m.c.a.);

$\rho$  é a massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ ).

Falvey (1982), na Figura 18, delimita áreas com possibilidade de danos relacionados a cavitação para um determinado tipo de descontinuidade. A análise é realizada considerando o índice de cavitação da Equação 26 e o tempo de exposição do escoamento a superfície. Ainda pôde definir quais foram as velocidades apresentadas nas delimitações criadas.

Figura 18 – Danos causados por cavitação em função do tempo e uma superfície hidráulica de concreto.



Fonte: adaptado de Falvey (1982).

Lopardo (1982) recomenda que a análise de pressões em estudos de modelo e protótipo sejam feitas com aquelas que apresentam 0,1% de probabilidade de não excedência, para a verificação da tendência a cavitação. Explica o fato de que aumentam os riscos de cavitação quando existem depressões instantâneas devido aos pulsos de pressões com baixa frequência, mesmo que, em média, as pressões sejam superiores à pressão de vapor d'água e que, nestes casos, é complicado averiguar a possibilidade de cavitação, uma vez que não há como identificá-la em fluxos macroturbulentos, pois o coeficiente convencional de cavitação deixa de ser representativo. Lopardo (2003) relacionou a cavitação às pressões extremas negativas àquelas com 0,1% e 1% de probabilidade de não-excedência.

Portugal (1981) recomenda a consideração de que a resistência à tração máxima em uma superfície hidráulica de concreto deve ser de -6 m.c.a.

Kempka (2011) classificou o risco de erosão por desgaste no concreto por pressões negativas em função do tempo de permanência de pressões inferiores a -6 m.c.a. Assim:

- a) Situação incipiente: existência de pressões menores ou iguais a -6 m.c.a. em 0,1% do tempo ( $P_{0,1\%}$ );

- b) Situação crítica: existência de pressões menores ou iguais a - 6 m.c.a. em 1% do tempo ( $P_{1\%}$ );
- c) Situação de bloqueio: existência de pressões menores ou iguais a - 6 m.c.a. em 50% do tempo ( $P_{med}$ ).

Nos vertedouros e bacias de dissipação, os valores de pressão ficam próximos às pressões atmosféricas, uma vez que o escoamento é livre. Por isso, a cavitação é normalmente associada a fluxos de alta velocidade, podendo causar problemas para valores superiores a 15 m/s e problemas muito graves quando estiver acima de 25 m/s, se não foram tomadas as devidas precauções. (MAY, 1987)

A ocorrência do fenômeno em estruturas hidráulicas submetidas a fluxos intensos deve-se, principalmente, às irregularidades na superfície, conforme indicado por Quintela (1980):

- a) Irregularidades superficiais que limitam fronteiras ao escoamento, como fissuras, rachaduras e outras patologias existentes no concreto;
- b) Elementos estruturais, como juntas de dilatação, blocos de queda e amortecimento, blocos etc.;
- c) Materiais inadequados para o acabamento das superfícies.

Em calhas lisas de vertedouros (Figura 19), a cavitação ocorre, geralmente, devido a impurezas do líquido ou irregularidades na superfície. A água totalmente pura poderia suportar pressões negativas extremas sem a formação de cavitação (FALVEY, 1990), porém em seu estado natural é capaz de permitir a ocorrência de cavitação com pressões maiores do que a pressão de vapor d'água. (PETERKA, 1953)

No caso de calhas lisas, a cavitação ocorre pela formação de instabilidade na zona entre a superfície e a irregularidade, em que as bolhas colapsam e causam danos na superfície de concreto. Essas irregularidades podem ser degraus, curvaturas abruptas, ranhuras, superfícies rugosas e juntas protuberantes. (FALVEY, 1990)

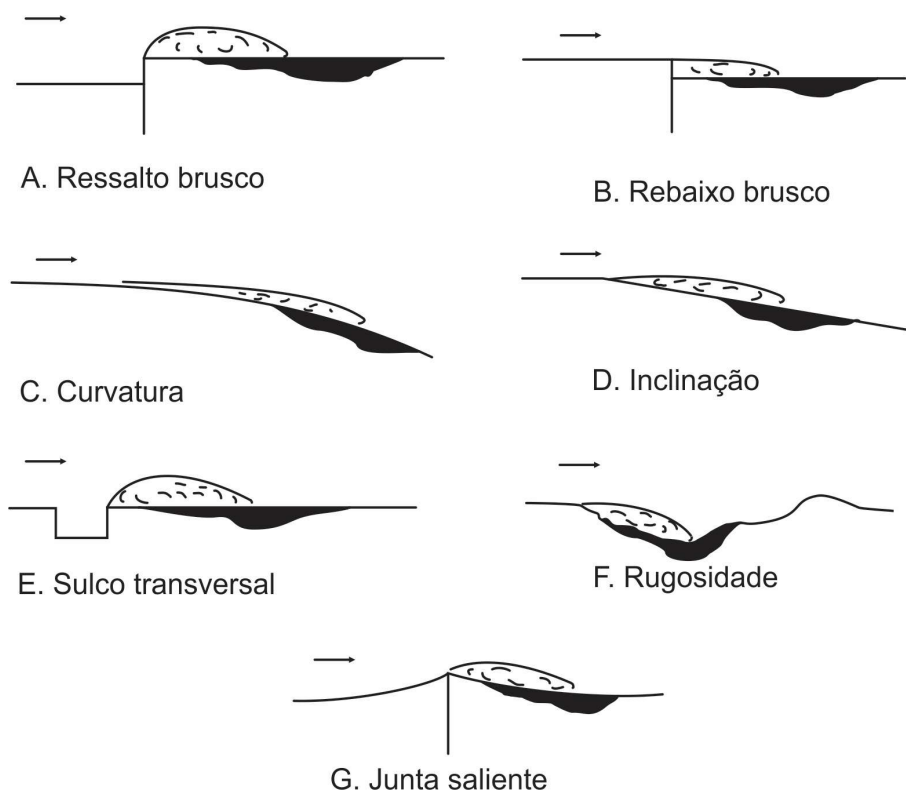
Figura 19 – Danos de cavitação em vertedouro de calha lisa na Barragem de Shahid Abbaspour.



Fonte: Simões (2012).

Ball (1976) apresentou alguns tipos de irregularidades que podem ocorrer nas superfícies do concreto e onde ocorreriam as zonas de "desgaste" na superfície do concreto. Para pequenas irregularidades, da ordem de poucos milímetros, a velocidade do escoamento deve ser considerada muito abaixo da velocidade média, se a camada limite estiver bem desenvolvida. Isto geralmente ocorre nas calhas de vertedouros. Para velocidades muito altas, da ordem de 40 m/s, e altas concentrações de vazão, acima de 20 m<sup>3</sup>/s/m, o efeito da camada limite não é suficiente para reduzir significativamente o risco de cavitação. Neste caso, as flutuações de pressão causadas pela turbulência do escoamento devem ser responsáveis pelo surgimento de baixas pressões, produzindo cavitação. Ball (1976) especificou as relações máximas que as irregularidades na superfície do concreto devem ter em função da velocidade média do escoamento. Irregularidades da ordem de 20H:1V, para velocidades entre 12 a 28 m/s; de 50H:1V, para velocidades entre 28 e 37 m/s e de 100H:1V, para velocidades acima de 37 m/s. As diversas formas de irregularidades são apresentadas na Figura 20.

Figura 20 – Irregularidades existentes em superfícies hidráulicas de concreto.



Fonte: Abreu (2014 adaptado de Quintela, 1980).

As irregularidades podem ser classificadas, conforme Quintela (1980), como isoladas ou distribuídas e, para cada uma, se pode observar diferentes valores de parâmetros críticos de cavitação.

Para as irregularidades isoladas, se usa a Equação 27.

$$\sigma_{cr} = C \cdot \left(\frac{d}{\delta}\right)^m \left(\frac{v_m \cdot \delta}{v}\right)^n \quad (27)$$

Onde:

$C$ ,  $m$  e  $n$  dependem da forma da singularidade (Tabela 5);

$d$  é a altura da irregularidade (m);

$\delta$  é a espessura da camada limite (m);

$v$  é a viscosidade cinemática (Pa/s);

Salienta ainda que a Equação 27 só pode ser aplicada para domínios de  $0 < \frac{d}{\delta} \leq 5$  e relações visualizadas no Tabela 5.

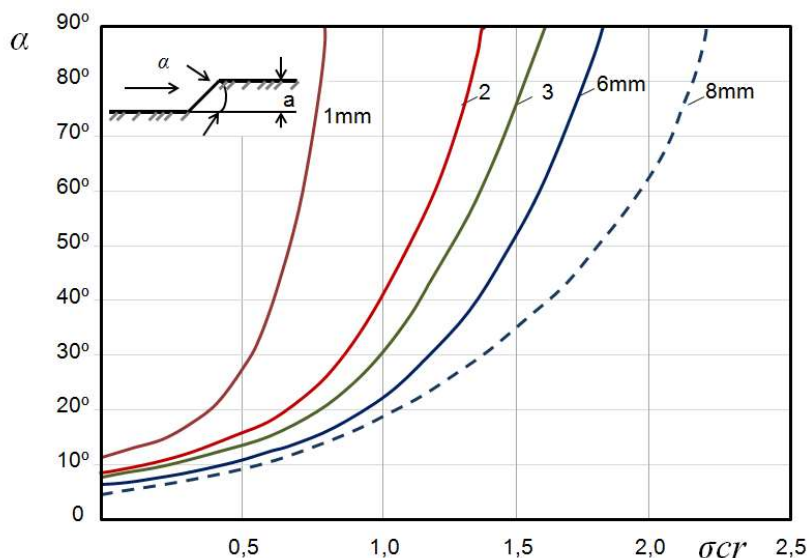
Tabela 5 – Dimensões e formas de irregularidades superficiais.

C	m	n	Esquema
0,1520	0,361	0,196	
0,0410	0,344	0,257	
0,0108	0,439	0,298	
0,0033	0,632	0,451	
0,0012	0,737	0,550	
0,0003	0,041	0,510	

Fonte: adaptado de Quintela (1980).

Galperin (1977) relacionou graficamente diferentes parâmetros críticos de cavitação para diferentes ângulos de irregularidades apresentadas na superfície de concreto, como observado na Figura 21.

Figura 21 – Variação do parâmetro crítico de cavitação em ressaltos com chanfros.



Fonte: adaptado de Galperin (1977 apud Quintela, 1980).

Não somente as irregularidades favorecem a ação de erosão por cavitação. A rugosidade do concreto também propicia o fenômeno. Porém, é evidente que os efeitos causados pelas irregularidades são bem maiores. (PINTO, 1979)

Como exemplo, cita-se a UHE de Ilha Solteira, localizada no Mato Grosso do Sul, em que, com a velocidade da água, os blocos dissipadores de energia no vertedouro provocaram subpressão em regiões subjacentes a eles, originando danos por cavitação. (SALLES, 1980).

Em 1974 foram feitos os primeiros reparos nos danos causados e, mesmo assim, o problema continuou persistindo. No período de chuva seguinte os reparos foram arrancados (LEITE et al., 1990). Novos reparos foram realizados, sob supervisão de laboratório e laudos de consultores, mas sem resultados satisfatórios, o que demonstra a necessidade e a dificuldade de se obterem materiais resistentes ao fenômeno de cavitação (SALLES, 1980).

De acordo com PINFARI ET AL., (2003), a CESP, Companhia Energética de São Paulo, através da Diretoria de Geração Oeste, construiu um dispositivo em concreto armado conhecido como antivórtice sobre as soleiras dos vãos do vertedouro da usina, além de realizar os reparos na superfície hidráulica de concreto. Este dispositivo consiste na alteração da geometria do perfil vertente e dissipador para

evitar a formação de vórtices nas quinas dos blocos. Assim, possuem formato de asa delta e foram construídos sobre os blocos dissipadores e as soleiras de 17 vãos do vertedouro.

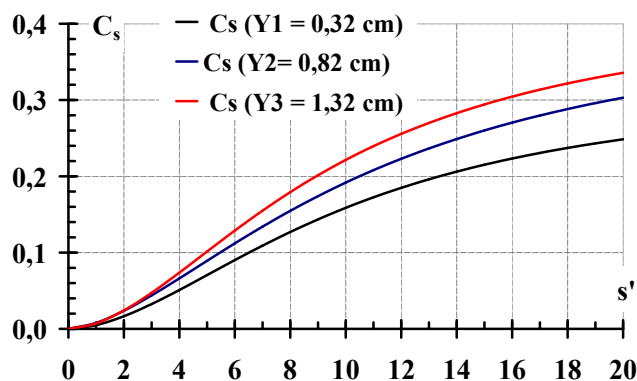
A aeração do escoamento em alta velocidade também é benéfica para evitar que o fenômeno cause danos a estrutura, pois proporciona a proteção da superfície hidráulica através de um colchão de ar. O ar, ao se misturar com a camada líquida, faz com que o escoamento apresente maior compressão e elasticidade, capaz de absorver impactos das ondas de pressão que se formem logo após o colapso das bolhas oriundas da cavitação (QUINTELA, 1980).

Galperin et al. (1971) cita que a presença de concentrações de ar ( $C$ ) próximas às fronteiras superficiais da estrutura hidráulica de 5% a 8% deve eliminar ou reduzir significativamente o risco de dano por cavitação no concreto.

Peterka (1953) define que uma concentração de ar, determinada pela razão entre volume de ar e volume total de água e ar do escoamento, de 7% é suficiente para evitar os danos provocados pela cavitação no concreto.

Matos (1999) apresenta modelos capazes de prever a concentração média de ar ( $C_s$ ) afastada em  $Y_1=0,32$  cm,  $Y_2 = 0,82$  cm e  $Y_3 = 1,32$  cm do pseudo-fundo da calha de um vertedouro em degraus. Na Figura 22 pode-se observar que, quanto mais afastado do fundo do escoamento, maior a concentração de ar. Por isso, faz-se necessário que a concentração de ar determinada seja o mais próximo possível do pseudo-fundo para garantir a proteção da estrutura.

Figura 22 – Concentrações médias de ar em diferentes distâncias do pseudo-fundo da estrutura.



Fonte: Matos (1999).



Na Tabela 6 estão apresentados os coeficientes de ajustes da Equação 28 desenvolvida por Matos (1999).

Tabela 6 – Determinação dos coeficientes gerados para a Concentração Média de ar ( $C_s$ ).

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

Fonte: Matos (1999).

$$C_s = \frac{a}{1 + \left(\frac{s'}{b}\right)^c} \quad (28)$$

Onde,

a, b e c são parâmetros do modelo (Tabela 6);

Matos (1999) ainda afirma que para atingir a condição indicada de 8% de aeração próximo ao fundo da estrutura, o fluxo aerado alcançou uma distância até o ponto inicial de aeração superior a seis vezes a altura d'água naquele ponto ( $s' > 6$ ), considerando a distância mais desfavorável de leitura próxima aos degraus ( $Y_1 = 0,32$  cm).

Atualmente, os estudos estão voltados para a aeração do fluxo corrente nas estruturas, visando determinar uma metodologia que facilite a proteção dos degraus do dano provocado pela cavitação, como é o caso de Priebe (2020), que utiliza defletores no primeiro degrau após a ogiva e pilares como aeradores, visando obter uma aeração maior do fluxo e protegendo os degraus contra os danos causados pela cavitação.

## 5 MATERIAIS E MÉTODOS

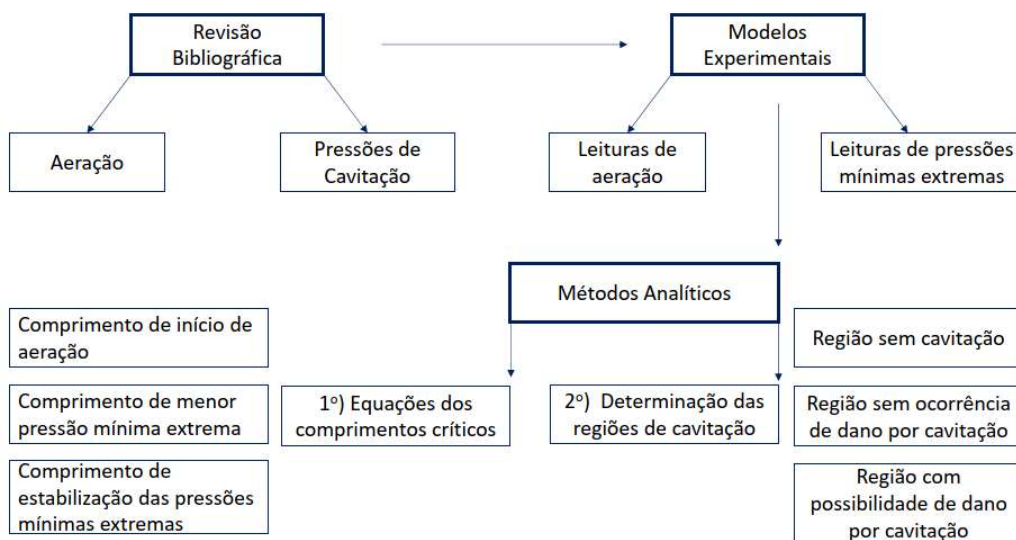
### 5.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

A metodologia empregada nesta pesquisa consiste em analisar e identificar as regiões críticas propensas aos danos relacionados ao fenômeno de cavitação ao longo de um vertedouro em degraus, a partir das condições hidráulicas, geométricas da estrutura e de aeração, que remetem à proteção da superfície. A definição das condições que podem provocar danos na estrutura foi realizada a partir de uma investigação teórico-experimental baseada em estudos analíticos e em dados de modelos experimentais transpostos para protótipo.

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Pré-Aeração”, estabelecido entre o IPH/UFRGS e a Eletrobrás-FURNAS.

A Figura 23 apresenta o desenvolvimento do trabalho esquematicamente. Após explorar a bibliografia acerca do comportamento das pressões que geram a cavitação e da aeração natural ao longo da calha de vertedouro em degraus, são coletadas as leituras de aeração natural e de pressões mínimas extremas em 3 vertedouros em degraus. De maneira a analisar os dados, são realizadas, primeiramente, equações que determinem o comprimento crítico de início de aeração, de menor pressão mínima extrema e aeração total em um escoamento deslizante sobre turbilhões; após, utilizando as equações desenvolvidas e equações de autores apresentados na revisão bibliográfica, puderam ser determinadas as zonas de cavitação.

Figura 23 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.



Fonte: elaborado pela autora.

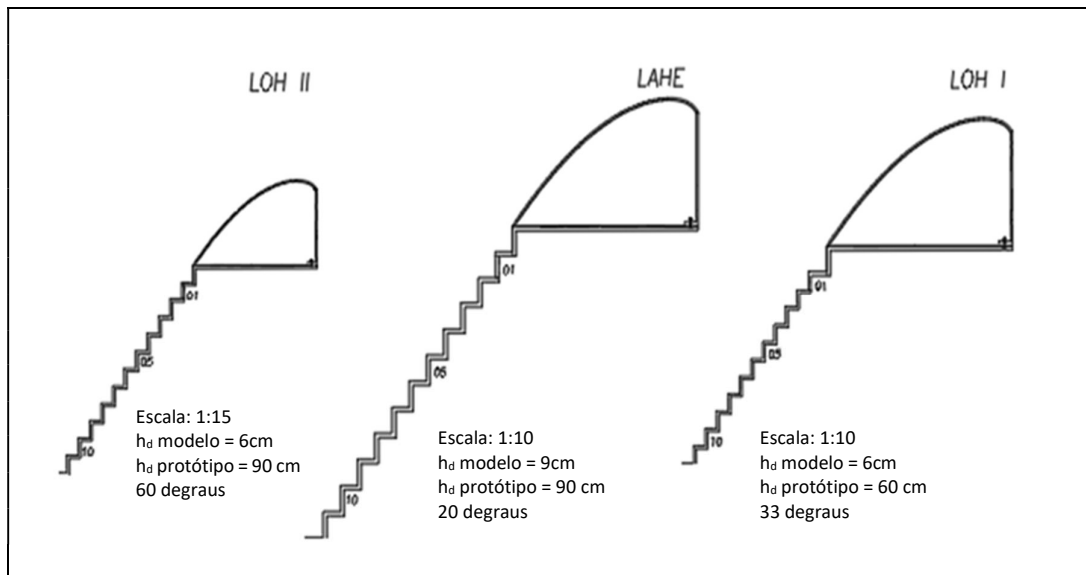
## 5.2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Os dados utilizados nesta pesquisa têm origem nas coletas realizadas por Canellas (2020) e Priebe (2020). A análise baseia-se nos dados de pressão e vazão obtidos em três modelos experimentais de vertedouros em degraus com características distintas, submetidos ao escoamento deslizante sobre turbilhões e sujeito ao processo de aeração natural. Um dos modelos (LAHE) está instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental, da Eletrobrás Furnas e os outros dois (LOH I e LOH II), alocados no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os modelos constituem-se de um sistema de alimentação de água, canal de montante, ogiva de perfil *Creager* e calha do vertedouro em degraus (composta de chapas de ferro galvanizadas e paredes laterais de acrílico transparentes, fixadas em perfis metálicos).

Na Figura 24 são observados, esquematicamente, as estruturas hidráulicas (perfil vertente e calhas em degraus) dos modelos utilizados para a obtenção dos dados. Ressalta-se a utilização de alturas de degraus ( $h_d$ ) de 6 e 9 cm, com escalas

sugeridas de 1:10 e 1:15, proporcionando geometrias diferentes para a ampliação das alternativas experimentais




Figura 24 – Esquema das estruturas hidráulicas dos modelos utilizados.



Fonte: adaptado de Canellas (2020).

Na Tabela 7, são apresentadas as características relacionadas aos modelos experimentais apresentados na Figura 24. Observa-se que faixa de vazões utilizada foi da ordem de 0,05 a 0,44  $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$ , em que o modelo LOH II obteve a maior abrangência de dados.

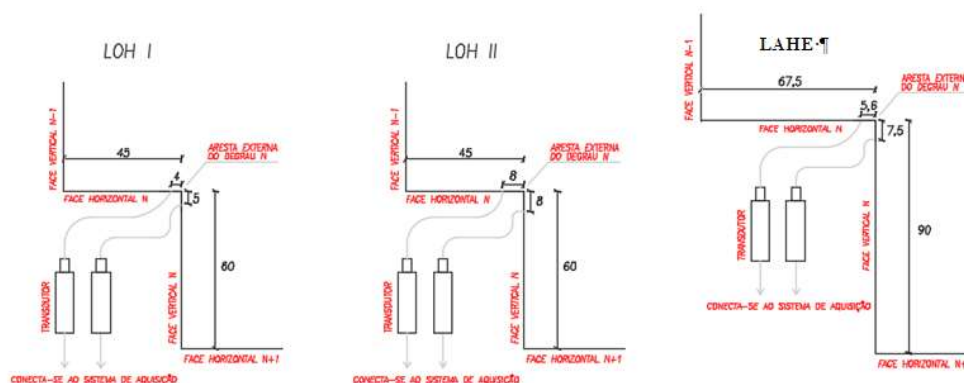
Tabela 7 – Características dos modelos físicos reduzidos utilizados para o trabalho.

	LOH I	LOH II	LAHE
Altura degrau (m)	0,060	0,060	0,090
Profundidade Patamar (m)	0,045	0,045	0,0675
Altura da ogiva (m)	0,44	0,29	0,44
Largura da calha (m)	0,40	0,50	1,15
Escala	1:10	1:15	1:10
Declividade	1V:0,75H	1V:0,75H	1V:0,75H
Vazões (m <sup>3</sup> /s/m)	0,10 - 0,40	0,05 - 0,44	0,10 - 0,40
Número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha	5,23 - 19,20	2,82 - 22,79	2,84 - 10,11
			

Fonte: adaptado de Canellas (2020).

Para a obtenção das pressões, foram instalados transdutores nas proximidades das quinas dos degraus, na linha central da calha, conforme pode ser observado na Figura 25. As tomadas de pressão foram conectadas aos transdutores através de mangueiras de náilon com 23 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro interno, conforme orientações de Lopardo (1987) e Prestes (2019).

Figura 25 – Esquema de ponto de tomada de pressão nas quinas dos degraus (dimensões em milímetros).



Fonte: Canellas (2020).

Nos modelos nomeados como LOH I e LOH II foram realizadas leituras nos degraus pares e ímpares separadamente, devido a limitação de recursos (transdutores) para medição em todos os degraus em uma única vez. Algumas tomadas de pressão foram mantidas durante todas as leituras, com o objetivo de validar os dados obtidos.

O tempo e a frequência de aquisição dos dados nos três modelos físicos seguiram as premissas indicadas por Lopardo (1987), sendo as coletas realizadas com frequência de 100 Hz durante 10 minutos.

A Tabela 8 reúne as principais características relacionadas aos transdutores de pressão instalados nos modelos físicos reduzidos, como os degraus em que foram realizadas as leituras e as faixas de operação destes transdutores.

O nível d'água foi verificado a montante da ogiva, no canal de aproximação, a partir de uma ponta linimétrica instalada no seu centro, com o objetivo de verificar a estabilização das vazões aplicadas.

Tabela 8 – Principais características dos transdutores de pressão adicionados nos degraus dos modelos físicos reduzidos.

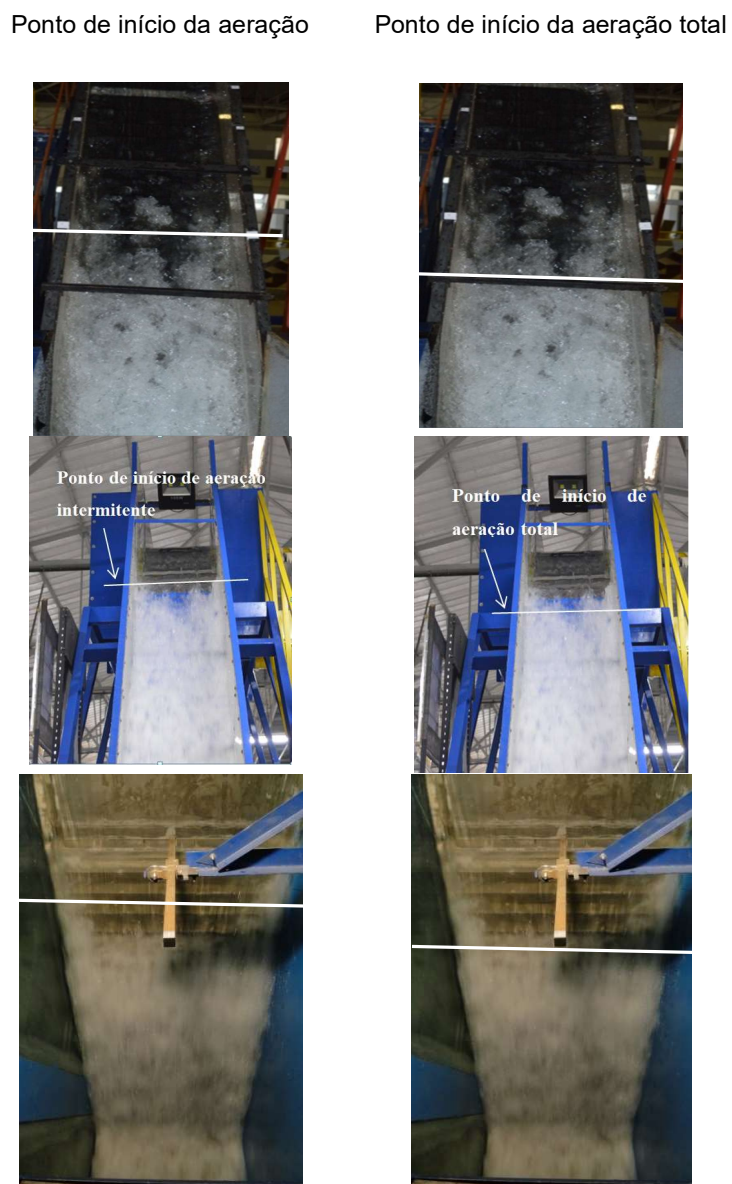
Características	LOH I	LOH II	LAHE I
Degraus instrumentados	2 ao 28	2, 3, 4,5, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15, 16, 20, 25, 29, 40, 46 e 51	2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 11, 12, 14, 15 e 16.
Faixa de medição dos transdutores (em psi)	-1,5 a 2,5 -1 a 4 - 2,13 a 4,3 - 0,7 a 0,7 -3 a 3 - 2,13 a 2,13	-1 a 1 -2,13 a 2,13 -2,5 a 2,5 2,13 a 4,3 -0,7 a 2,13 - 5 a 5 -1 a 4 -2,13 a 4,3	-1,4 a 2,8 -1,4 a 4,3
Marca dos transdutores	Zurich, Sitron e Instrutemp	Ômega e Sitron	Zurich

Fonte: adaptado de Canellas (2020).

Os comportamentos relacionados à posição de início de aeração do escoamento e ao início de aeração total foram realizados através de observação visual e fotografias (Figura 26). Assim, diz-se que o início da aeração do escoamento corresponde ao ponto em que o ar começa a ser inserido no escoamento em pontos esparsos da largura da calha e que, a aeração total corresponde ao local em que a aeração ocorre na totalidade da largura da calha, como pode ser observado nas delimitações apresentadas na Figura 26.

Para a determinação do comportamento do escoamento relacionado à cavitação em um vertedouro em degraus com aeração natural foram obtidas leituras de pressões mínimas extremas, nível d'água e comportamento da aeração. Os dados obtidos foram analisados a fim de determinar o comportamento das pressões ao longo da calha e identificar os pontos cruciais relacionados ao fenômeno de cavitação.

Figura 26 – Observação do escoamento para identificação das posições de início de aeração e aeração total.



Fonte: adaptado de Canellas (2020).

### 5.3 METODOLOGIA ANALÍTICA

O estudo das pressões mínimas extremas (pressão com 0,1% de probabilidade de não excedência -  $P_{0,1\%}$ ) nos degraus do vertedouro merece grande atenção, uma vez que estão intimamente ligadas à possibilidade de ocorrência da cavitação na



superfície de concreto quando atingirem pressões locais iguais à pressão de vapor da água, considerando a temperatura ambiente. As características do escoamento devem ser associadas a estes valores de pressões mínimas extremas a fim de definir os critérios de ocorrência do fenômeno de cavitação neste tipo de estrutura. Salienta-se, entretanto, que a efetiva ocorrência do dano depende também de outros fatores, como por exemplo, a irregularidade da superfície, a presença de juntas, a composição, a resistência do concreto empregado e a aeração do escoamento junto ao concreto.

Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Novakoski et al. (2018) e Canellas (2020) concordam que os espelhos dos degraus configuram as regiões mais críticas quando se referem às pressões negativas associadas aos danos por cavitação.

Lopardo (1982) e Kempka (2014) recomendam que a análise de pressões para verificar a tendência de cavitação sejam feitas com àquelas que apresentam 0,1% de probabilidade de não excedência, pois aumentam os riscos de cavitação quando existem depressões instantâneas devido aos pulsos de pressões com baixa frequência, mesmo que, em média, as pressões sejam superiores à pressão de vapor d'água e que, nestes casos, é complicado averiguar a possibilidade de cavitação.

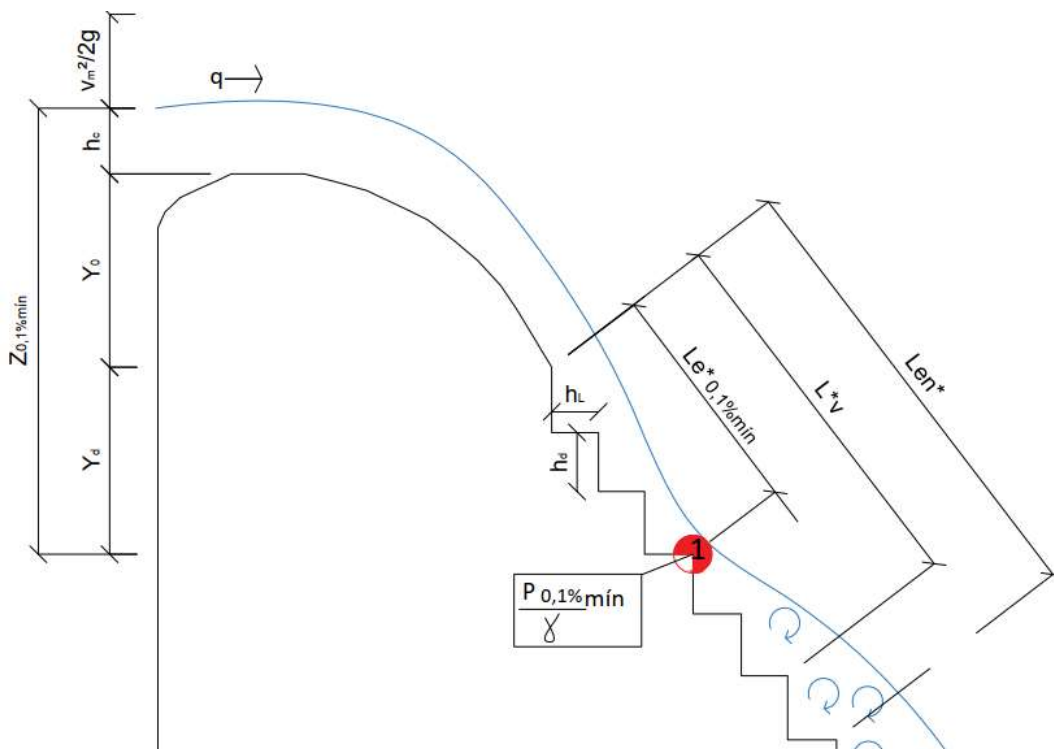
Assim, este estudo concentra-se na análise das características macrotubulentas do escoamento em vertedouros em degraus a partir da distribuição longitudinal das pressões com 0,1% de probabilidade de não-excedência (aqui admitidas como pressões extremas mínimas) que ocorrem nas quinas dos espelhos dos degraus, de maneira a identificar a possibilidade de ocorrência do fenômeno de cavitação e os danos relacionados a ele. As pressões mínimas com 0,1% de probabilidade de não excedência que atingiram ou excederam -10,09 m.c.a. (admitindo a pressão absoluta de vapor d'água a 20°C), respectivamente, quando transpostas para protótipos, foram consideradas condicionantes ao fenômeno de cavitação.

A metodologia foi dividida em duas partes principais. Na primeira parte, foram identificadas equações que permitem localizar os pontos críticos relacionados ao escoamento macroturbulento de um vertedouro em degraus. A segunda parte é responsável por definir as regiões críticas relacionadas à possibilidade de danos ocasionados pelo fenômeno de cavitação ao longo de uma calha de vertedouro em degraus em protótipo, em função de características geométricas e hidráulicas.

### 5.3.1 Localização das pressões críticas em um vertedouro em degraus

Para esta análise, é necessário, inicialmente, conhecer as nomenclaturas adotadas para as incógnitas presentes no estudo, como é apresentado na Figura 27.

Figura 27 – Esquema prático das configurações do vertedouro em degraus utilizado na metodologia deste trabalho.



Fonte: elaborada pela autora.

Onde,

$g$  – aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );

$h_c$  – altura crítica do escoamento (m);

$h_d$  – altura de degrau (m);

$h_L$  – profundidade do degrau (m);

$L_v^*$  – comprimento de aerção visual inicial, a partir do primeiro degrau da calha (m);

$L_e^{*0,1\%mín}$  – comprimento desde o primeiro degrau até o ponto de menor pressão mínima extrema (m);

$L_{en}^*$  - comprimento de aerção máxima a partir do primeiro degrau (m);

$P_{0,1\%mín}$  – menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência (m.c.a);

$q$  – vazão específica do escoamento ( $m^3/s/m$ );

$v_m$  – velocidade média de escoamento (m/s);

$Y_0$  – altura da ogiva do vertedouro (m);

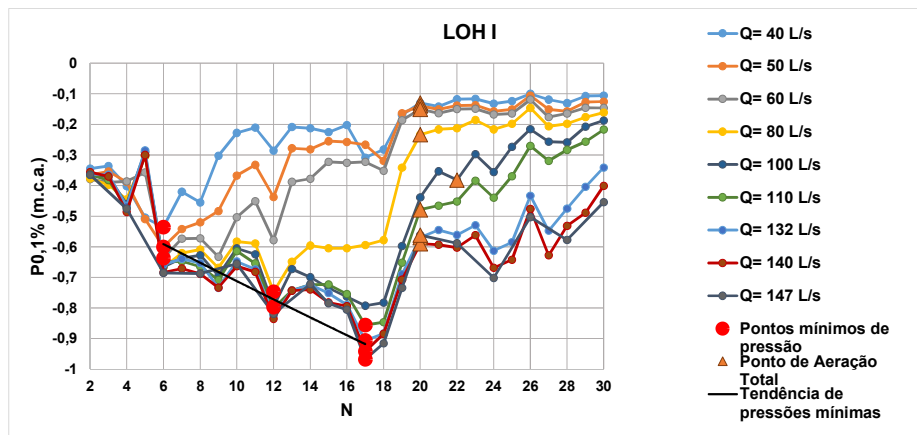
$Y_d$  – altura do primeiro degrau ao degrau determinado (m); e

$Z_{0,1\%mín}$  – energia total a montante até o ponto de menor pressão mínima extrema (m).

O comportamento das pressões extremas na calha de vertedouros em degraus foi estudado por Canellas (2020). A título de exemplo, a Figura 28 representa os comportamentos observados pela autora para as pressões extremas mínimas ( $P_{0,1\%}/\gamma$ ), destacando que as pressões mínimas extremas com 0,1% de probabilidade de não excedência:

- a) têm um comportamento similar entre as diferentes vazões;
- b) ocorrem muito próximas ao ponto de início de aeração ( $L_a, L^*_v$ );
- c) após atingirem seu valor mínimo, crescem novamente até se tornarem “uniformes” no ponto de aeração máximo ( $L_{en^*}$ ); e
- d) apresentam um comportamento semelhante antes do ponto de pressão mínima para cada vazão específica, em que as vazões específicas maiores percorrem os valores obtidos para vazões menores. As pressões de vazões maiores seguem a mesma linha de tendência dos dados de pressão das vazões menores, representada pela reta preta da Figura 28, seguindo-a até o seu mínimo valor de pressão extrema.

Figura 28 – Dados de pressão com 0,1% de probabilidade de não-excedência no vertedouro LOH I.



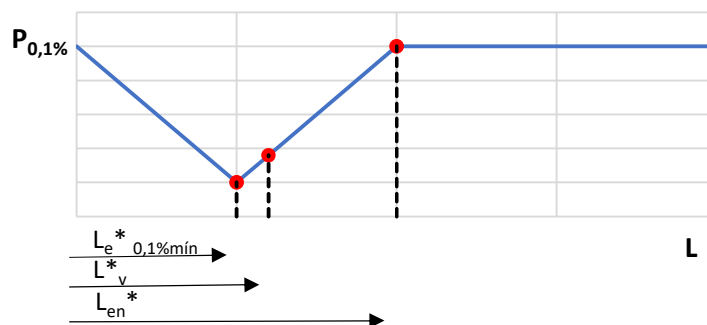
Fonte: elaborada pela autora.

Com isso, sabe-se que é possível identificar qual a zona de abrangência da ação da cavitação ao longo de uma calha de um vertedouro em degraus, em função da vazão aplicada. Assim, observa-se que as pressões ao longo da calha de um vertedouro em degraus apresentam três pontos característicos e importantes na definição de pressões extremas negativas. Sendo eles:

- Ponto mínimo de pressão ( $L_e^{*0,1\%min}$ ), indicando o local onde é esperado o menor valor de pressão mínima extrema ( $P_{0,1\%}$ ) para determinada vazão. Caso a menor pressão extrema mínima com 0,1% de probabilidade de não excedência atinja  $-10,09$  m.c.a. (pressão de vapor da água), é iniciado o fenômeno de cavitação;
- Ponto de aerção visual inicial ( $L_v^*$ ), indicando o desenvolvimento da aerção do fluxo (e possível proteção dos degraus); e o
- Ponto de aerção total ou ponto de estabilização das pressões extremas negativas ( $L_{en}^*$ ), indicando a completa aerção e proteção dos degraus contra o fenômeno de cavitação. Salienta-se que, se a pressão retornar a um valor maior do que  $-10,09$  m.c.a., o fenômeno de cavitação deixa de ocorrer, mas a aerção total ainda ocorre.

Na Figura 29 esses pontos podem ser identificados esquematicamente.

Figura 29 – Esquema representativo do comportamento das pressões mínimas extremas e pontos de aeração.



Fonte: elaborada pela autora.

Os dados obtidos (conforme descrito no item 4.2) foram analisados de forma a obter as retas de tendência, bem como as equações correspondentes de cada um dos pontos ( $L_{e^{*}0,1\%mín}$ ,  $L_{v}^{*}$  e  $L_{en}^{*}$ ). Assim, foi possível identificar as equações que melhor se ajustaram ao conjunto de dados adimensionalizados, possibilitando a busca destas localizações com a interação entre as formas geométricas e hidráulicas. Também foi identificada as relações de distanciamento entre os pontos de aeração visual inicial, menor pressão mínima extrema e aeração total.

É importante ressaltar que os estudos apresentados até então sobre o comprimento de aeração em vertedouros em degraus, com exceção do estudo proposto por Canellas (2020), utilizam as adimensionalizações de determinação do comprimento de aeração considerando a crista do vertedouro até o degrau de observação. Neste estudo, com o intuito de remover a interferência das escalas de ogiva, as equações foram obtidas removendo-se os fatores de influência do trecho da ogiva.

### 5.3.2 Determinação das Regiões de Cavitação

Para a determinação das regiões de cavitação, os valores a simularem situações de protótipo apresentam dimensões de degraus e declividade de calha recorrentes na construção de vertedouros em degraus no mundo:

- a) alturas de degraus ( $h_d$ ): 30, 60, 90 e 120 cm;
- b) inclinações de calha ( $\theta$ ): 53,13° e 45°.

As regiões relacionadas à ocorrência do fenômeno de cavitação serão apresentadas a partir de uma relação entre carga hidráulica total sobre o vertedouro da barragem ( $Z$ ) em função da vazão específica ( $q$ ). Assim pode-se determinar a abrangência, em metros, da zona crítica do vertedouro que apresenta possibilidade de apresentar danos por cavitação quando a estrutura for submetida a vazões específicas capazes de gerar os picos de pressão de -10,09 m.c.a. e não apresentar aeração suficiente para proteger a superfície.

As características do escoamento foram associadas às equações de pressões mínimas extremas, de maneira a definir os critérios de ocorrência do fenômeno de cavitação nos vertedouros em degraus. Salienta-se, mais uma vez, que a efetiva ocorrência do dano depende também de outros fatores, como por exemplo, a irregularidade da superfície, presença de juntas, composição e resistência do concreto empregado e a aeração junto ao concreto.

As equações a serem obtidas a partir da metodologia aplicada no item 5.3.1 e apresentadas nos resultados do item 6.1, as equações propostas por Matos (1999), apresentadas no item 4.4 e Canellas (2020), no item 4.3.2, foram calculadas e transpostas para os gráficos com diferentes combinações geométricas (altura de degrau, inclinação da calha e pressão de cavitação a -10.09 m.c.a.). Assim, puderam ser delimitadas, em um gráfico de carga hidráulica total sobre o vertedouro da barragem em função vazão específica ( $Z \times q$ ):

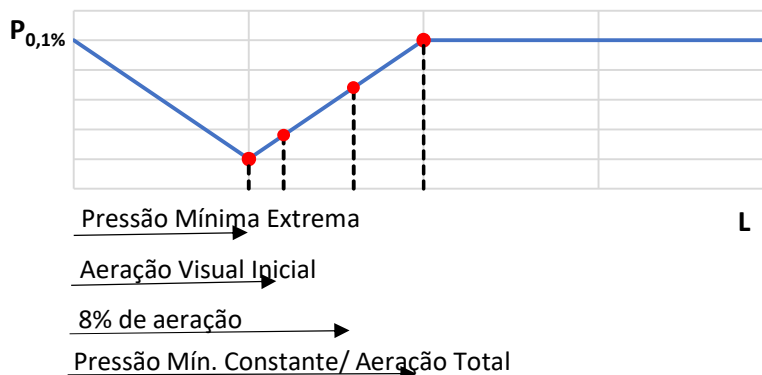
- a) regiões sem cavitação;
- b) regiões sem ocorrência de dano por cavitação; e
- c) regiões com possibilidade de dano por cavitação;

Além disso, nesses gráficos puderam ser representadas as tendências obtidas no decorrer da calha e do aumento de vazão para:

- a) pressão mínima extrema;
- b) aeração visual inicial;
- c) 8% de aeração; e
- d) aeração total.

A Figura 30 representa esquematicamente a localização de cada ponto ao longo da estrutura.

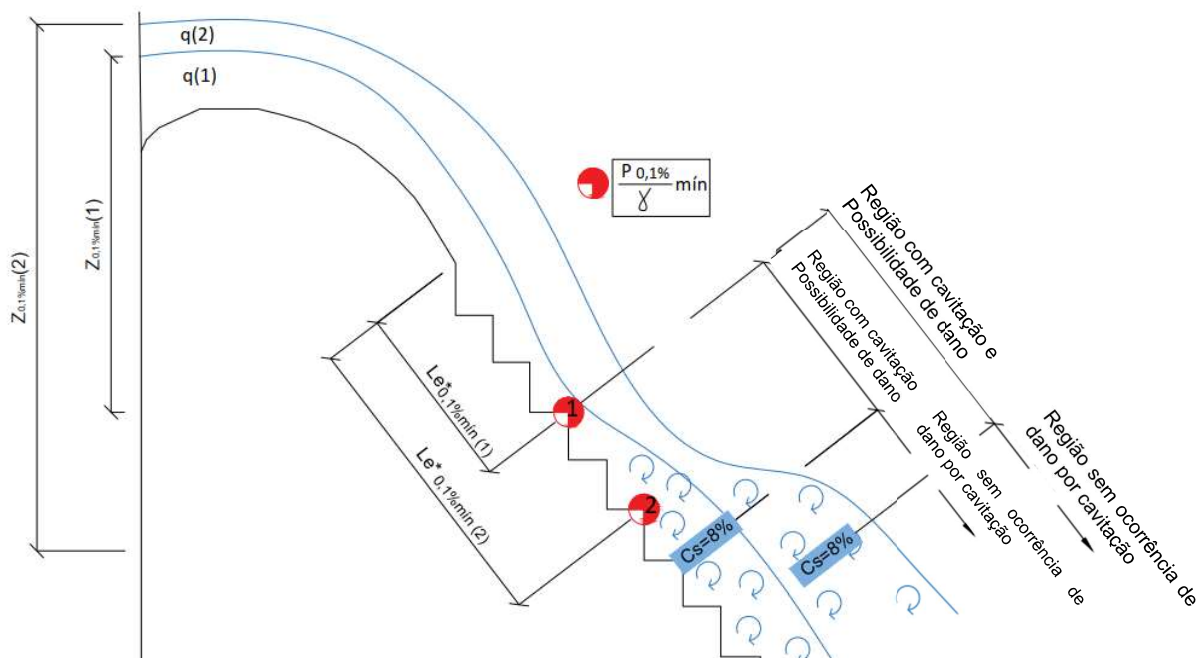
Figura 30 – Esquema representativo dos pontos de pressão mínima extrema e pressão constante ao longo da calha do vertedouro, que serão equacionados neste trabalho.



Fonte: elaborada pela autora.

Para compreender as regiões e as incógnitas utilizadas no estudo, foi criada a Figura 31.

Figura 31 – Esquema representativo da Região de Fenômeno de Cavitação para pressões mínimas extremas em um vertedouro em degraus, em que  $q(1) < q(2)$ .



Fonte: elaborada pela autora.

Onde,

$C_s=8\%$  - ponto onde foi atingida a concentração de ar de 8% no fundo do escoamento, determinado no item 4.3.2.2;

A seguir, os itens discorrem sobre como foram delimitadas as Regiões de Cavitação para cada uma das condições de protótipo mencionadas. Para tornar a leitura e compreensão dos passos mais claras, serão apresentados os gráficos sem escala e sem resultados, apenas demonstrando o processo de criação e interpretação.

#### 5.3.2.1 Início do escoamento deslizando sobre turbilhões

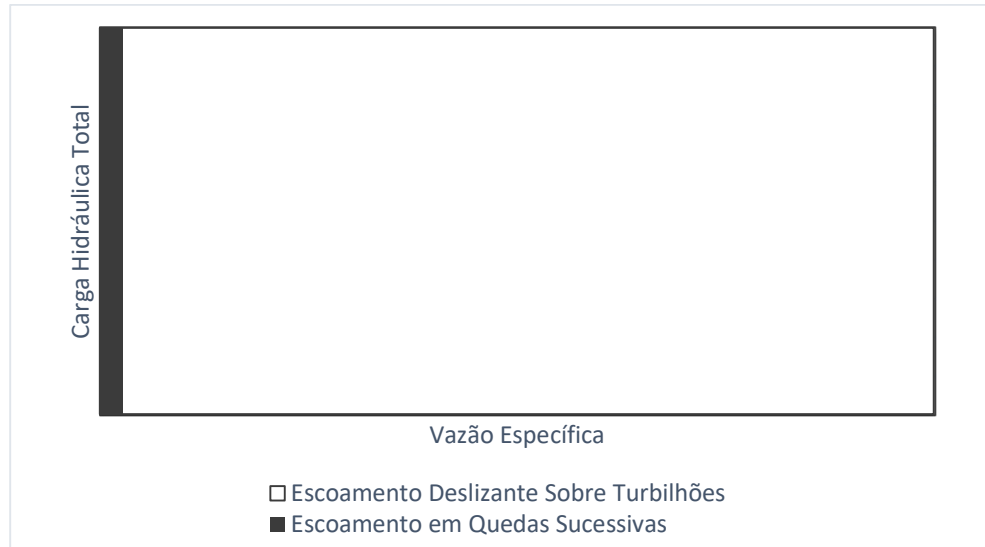
Conforme apresentado no item 4.3, o escoamento deslizando sobre turbilhões é o mais encontrado em vertedouros em degraus, devido às altas vazões envolvidas. Ainda, conforme Chanson (1994a), o processo de aeração só é possível quando o escoamento atingir este estágio.

Assim, ao serem analisados os estudos apresentados no item 4.3, identifica-se que a relação empírica apresentada na Equação 3 proposta por Fael e Pinheiro (2003) caracterizam os resultados mais confortáveis em relação à segurança oferecida e apresentam incógnitas compatíveis com os dados obtidos experimentalmente.

Assim, a Figura 32 demonstra que, para cada altura de degrau, foi obtida uma determinada vazão a partir do  $h_c$  proposto pela Equação 3 de Fael e Pinheiro (2003) para iniciar o escoamento deslizando sobre turbilhões. Entende-se, ainda, que o resultado é aplicado para toda a extensão da calha, por isso, o gráfico apresenta apenas duas barras inteiras, sendo que a cinza representa o escoamento em quedas sucessivas e, o branco, o escoamento deslizando sobre turbilhões, onde iniciam, de fato, as regiões relacionadas à cavitação.



Figura 32 – Delimitação do início do escoamento deslizando sobre turbilhões.



Fonte: elaborada pela autora.

### 5.3.2.2 Definição dos Limites de Aeração

Conforme citado no item 4.3.2, Gomes (2006), Osmar (2016) e Canellas (2020) observaram que o ponto de menor pressão mínima ocorre ligeiramente antes do ponto de aeração visual inicial. Ainda, Canellas (2020) observou que, ao atingir a aeração máxima uniforme do fluxo, as pressões tornam-se constantes no fluxo, sem a observância de picos negativos capazes de danificar os degraus do vertedouro por cavitação.

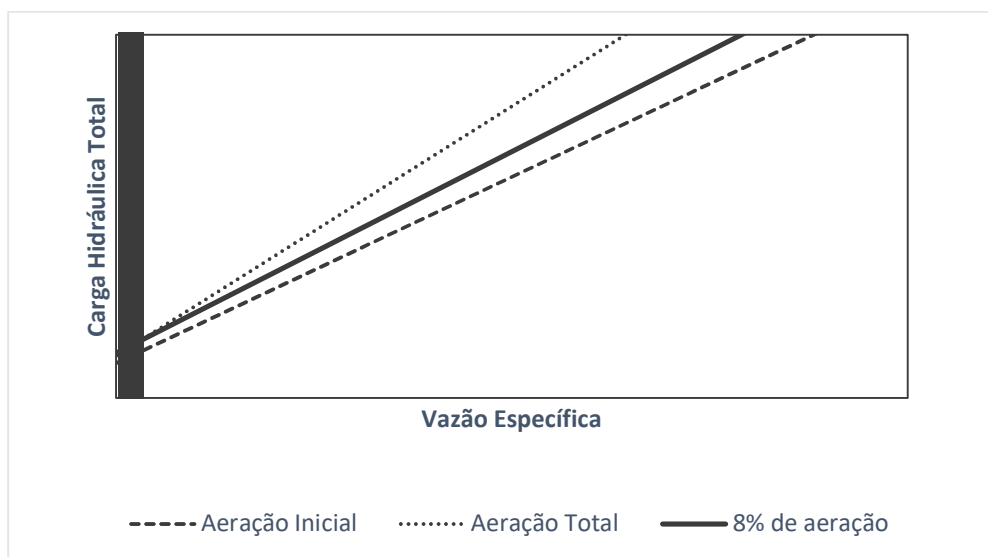
Para a análise das aerações inicial e total foram utilizadas as equações obtidas a partir da metodologia proposta no item 5.3.1 deste trabalho, considerando os comprimentos de aeração a partir do primeiro degrau da estrutura.

Para a concentração de ar de 8% próxima à superfície escalonada capaz de protegê-la dos danos provocados pela presença da cavitação, foi utilizada a Equação 28 de Matos (1999), apresentada no item 4.4 do referencial teórico, sendo  $s' = \frac{L_{total}^* - L^*}{h_a}$  ( $L_{total}^*$  - comprimento da calha total a partir do primeiro degrau da calha; e  $h_a$  a altura de lâmina d'água no ponto de aeração dada por Matos (1999), dado por  $\frac{h_a}{K} = 0,361 * Fr^{*0,606}$ ). Os coeficientes adotados para delimitar a concentração de ar no contato da

superfície hidráulica com o escoamento foram os localizados à 0,32 cm do fundo, pois é o local mais crítico observado pelo autor.

Na Figura 33 observam-se os pontos obtidos para o desenvolvimento do gráfico. A reta tracejada sugere o início de aeração, enquanto a linha sólida sugere a proteção do fundo da calha com 8% de aeração e a linha pontilhada aponta a aeração total do escoamento. Como é possível verificar, as faixas entre a aeração visual inicial, parcial e total do escoamento aumentam conforme aumenta a vazão específica, devido à dificuldade de estabilizar as pressões em vazões cada vez maiores.

Figura 33 - Delimitação dos pontos de aeração em um vertedouro em degraus.



Fonte: elaborada pela autora.

### 5.3.2.3 Regiões de Possibilidade de Dano por Cavitação

Para delimitar as regiões com possibilidade de dano por cavitação, foram utilizados os estudos de Canellas (2020), apresentados no item 4.3.2, combinados aos resultados obtidos a partir da metodologia proposta no item 5.3.1.

Canellas (2020) apresentou no item 4.3.2 equações capazes de identificar os valores de pressões, quando relacionadas a fatores de vazão específica, altura de degraus e carga hidráulica da estrutura. Para determinar a menor pressão mínima extrema ao longo da calha capaz de desenvolver o fenômeno de cavitação quando atingir a pressão de -10,09 m.c.a., associada a vazão específica e determinadas características geométricas, serão utilizadas as Equações 21 e 22, da Tabela 4.

Ao identificar o limite que inicia a primeira vazão responsável pelo limite de cavitação, é possível determinar a carga hidráulica do vertedouro necessária para que o fenômeno se desenvolva. Por fim, foram identificadas as regiões onde há possibilidade da ocorrência de danos por cavitação na estrutura.

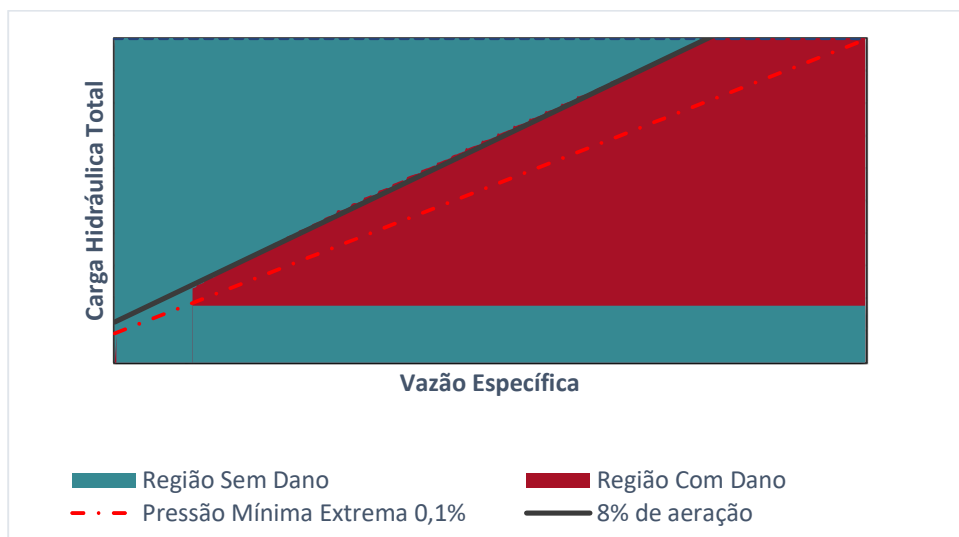
Como observado por Canellas (2020), ao se identificar a primeira pressão negativa extrema na calha de um vertedouro em degraus, os demais acréscimos de vazão irão seguir a tendência à diminuição de pressões cada vez menores e aumentando o intervalo de espaço necessário para que as pressões voltem a se estabilizar.

Com isso, ao se identificar o primeiro ponto de pressão mínima extrema que atingiu os -10,09 m.c.a., considerou-se que toda a extensão de calha a frente deste ponto inicial é passível da ocorrência de dano, até que apresentem as condições de aeração necessárias para proteger a superfície do estrago ou então que as pressões retornem a um valor superior aos -10,09 m.c.a.

Como apresentado no item 5.3.2.2, as equações propostas por Matos (1999) sugerem que a ocorrência de danos por cavitação é praticamente extinta quando houver 8% de aeração no contato do escoamento com a superfície. Assim, com a reta sólida obtida na Figura 33, delimita-se o ponto final da Região de Cavitação com Possibilidade de Dano.

A Figura 34 apresenta as regiões delimitadas em função da possibilidade ou não da ocorrência de dano na superfície de concreto. No gráfico, identifica-se que quanto maior a vazão do escoamento, maior a possibilidade da extensão do dano na superfície de concreto devido ao fenômeno de cavitação.

Figura 34 - Delimitação da região de dano por cavitação.



Fonte: elaborada pela autora.

#### 5.3.2.4 Gráfico final da Limitação das Regiões de Dano por Cavitação.

Os gráficos obtidos pelos itens 5.3.2.1, 5.3.2.2 e 5.3.2.3 foram compilados em um único gráfico para cada condição de variação de protótipo: 30, 60, 90 e 120 cm de alturas de degraus e inclinações da calha de 45° e 53.13°. Assim, o apresentado na Tabela 9, resume as principais equações utilizadas para o desenvolvimento do resultado da delimitação das regiões de cavitação em um vertedouro em degraus.

Tabela 9 - Resumo das fórmulas utilizadas para a criação do método visual para obtenção das regiões de cavitação em um vertedouro em degraus.

Menor pressão extrema mínima	Posição	Resultados obtidos a partir do item 5.3.1
	Menor Pressão extrema (Canellas, 2020)	$\frac{\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(F_r^*) - 0,5664$
Estabilização das pressões/ Aeração total	Posição	Resultados obtidos a partir do item 5.3.1
Aeração Visual Inicial	Posição	Resultados obtidos a partir do item 5.3.1
8% de aeração	A 0,32 cm do fundo (Matos, 1999)	$C_s = \frac{a}{\left(1 + \frac{s}{b}\right)^c}$

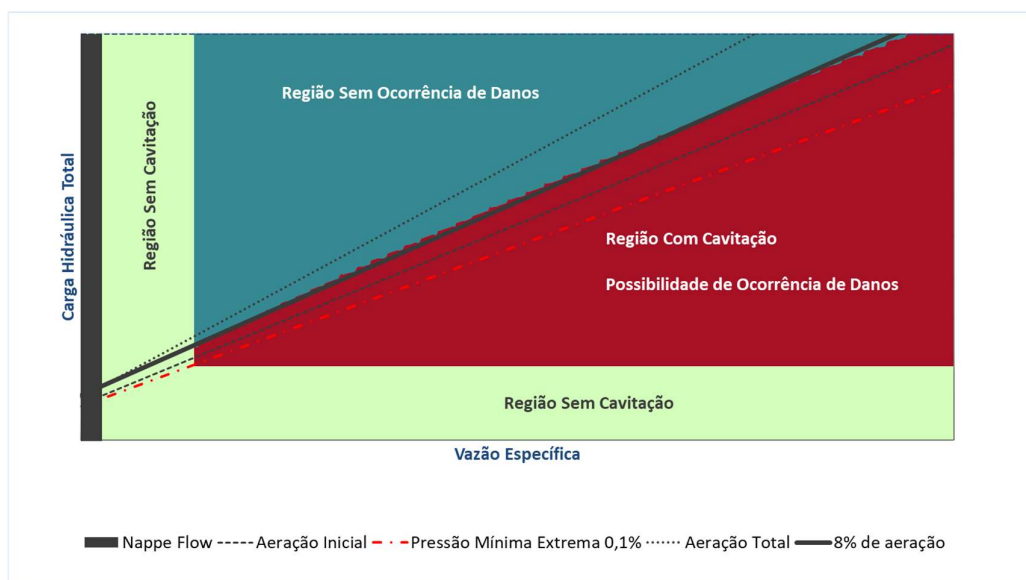
Fonte: elaborada pela autora.

Assim, foram identificadas as regiões livres de cavitação, regiões com a ocorrência de cavitação sem ocorrência de dano e as regiões com a ocorrência de cavitação e possibilidade de dano. Os dados foram apresentados seguindo o modelo proposto na Figura 35, delimitando:

- as regiões relacionadas à cavitação preenchidas em verde (Regiões Sem Cavitação), azul (Regiões sem ocorrência de dano por cavitação) e vermelho (Regiões com possibilidade de dano por cavitação);
- a divisão do escoamento em quedas sucessivas, representada pela barra cinza logo no início do gráfico;
- as linhas cinzas para indicar aeração visual inicial (tracejada), 8% de aeração do fundo do escoamento (sólida) e total (pontilhada);
- a linha vermelha tracejada para indicar o desenvolvimento das pressões extremas mínimas ao longo da calha e do aumento da vazão específica.

Deve-se ressaltar que na área azul (Regiões sem ocorrência de dano por cavitação) pode haver cavitação e quantidade de ar no fundo do escoamento suficiente para proteger os degraus da estrutura ou não ter cavitação devido ao aumento da pressão acima de -10,09 m.c.a.

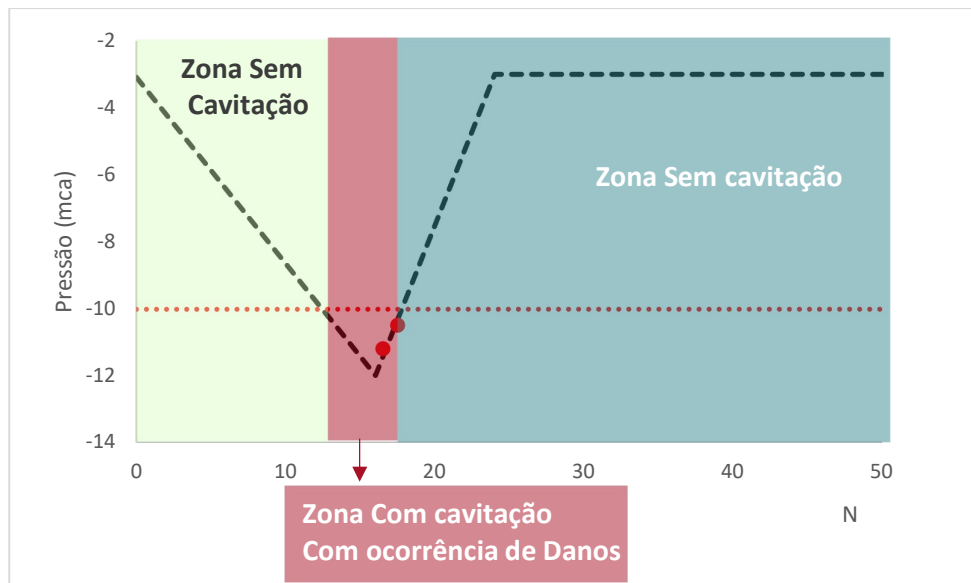
Figura 35 – Regiões de cavitação e de possibilidade de ocorrência de danos em um vertedouro em degraus.



Fonte: elaborada pela autora.

A título de representatividade do desenvolvimento das pressões nos pontos característicos ao longo da calha de vertedouro em degraus, foi desenvolvida a Figura 36. A figura apresenta o desenvolvimento das pressões mínimas extremas em ponto de vazão da Figura 35, realizando um corte transversal na mesma. Assim, pode se verificar como as regiões de cavitação se comportam em função do desenvolvimento dessas pressões mínimas extremas. Assim, a região sem cavitação se estende até que o ponto de menor pressão mínima extrema identifique a pressão de vapor d'água de -10,09 m.c.a, onde inicial a região de cavitação e a possibilidade de ocorrência de danos, visto que a região não contém a aeração necessária para a proteção da superfície hidráulica. Assim, ao atingir a concentração de ar de 8% no contato do escoamento com a superfície hidráulica, independente da pressão exercida naquele ponto, a superfície hidráulica está protegida contra os danos proporcionados pelo fenômeno, caracterizando o início da região de cavitação sem a ocorrência de danos. Ainda, quando as pressões retornam a um valor superior aos -10,09 m.c.a, o fenômeno de cavitação deixa de ocorrer.

Figura 36 – Corte transversal em gráfico de regiões de cavitação e possibilidade de danos, em situação de vazão específica constante.



Fonte: elaborada pela autora.

## 6 RESULTADOS

Os resultados desta dissertação serão apresentados em dois artigos publicados. Por isso, alguns itens já comentados inicialmente serão retomados.

No primeiro artigo, intitulado “Determinação dos comprimentos característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões baseados em pressões extremas mínimas em um vertedouro em degraus” foram obtidas equações que determinam os comprimentos críticos relacionados ao escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus, sendo eles: início de aeração visual, menor pressão mínima extrema e aeração total ou ponto onde as pressões mínimas extremas passam a oscilar em torno de um valor constante. Neste artigo também foram realizadas relações de distância entre os três pontos característicos.

No segundo artigo, intitulado “Delimitação de regiões de cavitação em um vertedouro em degraus”, foram obtidos gráficos para diferentes alturas de degraus e inclinações de calha de vertedouros em degraus que delimitam as regiões de ocorrência de cavitação e em quais delas devem ocorrer danos. Para isso, os gráficos foram realizados obtendo os valores de carga hidráulica total da estrutura, em metros, no eixo Y e vazões específicas, em  $m^3/s/m$  no eixo X. Ainda, neste artigo, foi possível determinar como as diferentes características influenciaram no comportamento do escoamento e das pressões relacionadas ao fenômeno de cavitação quando observadas as condições hidráulicas a que a estrutura é submetida.



## 6.1 DETERMINAÇÃO DOS COMPRIMENTOS CARACTERÍSTICOS DO ESCOAMENTO DESLIZANTE SOBRE TURBILHÕES BASEADOS EM PRESSÕES EXTREMAS MÍNIMAS EM UM VERTEDOIRO EM DEGRAUS

### RESUMO

A utilização de vertedouros em degraus expandiu-se significativamente devido a sua capacidade de dissipação de energia do escoamento ao longo da calha, reduzindo os custos com material, construção e operação de sua estrutura e da bacia de dissipação. Apesar disso, as pressões extremas mínimas geradas pelas altas velocidades de escoamento junto a quinas dos degraus podem produzir fenômenos de erosão e/ou cavitação ao longo da calha, prejudicando integridade da estrutura. Com isso, aumentam-se os custos com manutenção, além de reduzir a segurança estrutural. Por isso, este artigo visa determinar equações de definição das principais posições dos pontos críticos relacionados às características do escoamento em vertedouros em degraus, a partir do primeiro degrau da calha: aeração visual inicial ( $L_v^*$ ), local onde ocorre a menor pressão extrema mínima junto a quina do espelho ( $L_{e^*0,1\%min}$ ) e local a partir de onde a pressão extrema mínima onde passa a oscilar em torno de um valor médio constante ( $L_{en^*}$ ). A análise foi realizada a partir dos dados obtidos em três modelos físicos de vertedouros em degraus com diferentes características geométricas. Ao longo da calha, foram realizadas leituras de pressões junto ao espelho de todos os degraus e testadas diferentes vazões. Assim, pôde-se verificar o comportamento similar das pressões mínimas e de aeração no desenvolvimento da calha. Foi possível determinar, através de equações adimensionais, o comprimento de início de aeração, o comprimento de menor pressão mínima extrema e o comprimento de estabilização das pressões mínimas extremas ou de aeração total, em função do Froude expresso em termos de rugosidade da calha. A análise realizada verificou que o ponto de menor pressão extrema mínima ao longo da calha possui uma relação de 0,8 vezes o comprimento de aeração visual inicial, e que a posição onde as pressões oscilam em torno de um valor constante é 1,5 vezes maior do que a posição de aeração visual inicial.

## ABSTRACT

The use of stepped spillways has expanded significantly because of the possibility to dissipate energy along the chute, reducing the costs with material, construction and operation of the structure. Despite these, the minimum extreme pressures generated by the high flow velocities near the corners of the steps can produce phenomena of erosion and/or cavitation along the chute, damaging the integrity of the structure. Because of these, this article determined equations for defining the main positions of critical points related to the flow characteristics in stepped spillways, starting from the first step of the chute: start visual aeration ( $L^*_v$ ), the place where the lowest minimum extreme pressure occurs, close to the corner of the mirror ( $L_{e*0.1\%min}$ ) and place where the minimum extreme pressure starts to oscillate around a constant and average value ( $L_{en*}$ ). The analysis was carried out from the data obtained in three physical models of stepped spillways with different geometric characteristics. Along the channel, the pressures were read near the mirror all the steps. Different flow rates were tested. Thus, it was possible to verify the similar behavior of minimum pressures and aeration in the development of the stepped chute. It was possible to determine, by dimensionless, the length of the beginning of aeration, the length of the least extreme minimum pressure and the length of stabilization of the minimum extreme pressures or total aeration, depending on the Froude expressed in terms of the trough roughness. The analysis performed verified the lowest pressure point along the chute is 0.8 times before of the visual aeration length, and that the position where the pressures oscillate around a constant value is 1.5 times greater than the visual aeration position.

## INTRODUÇÃO

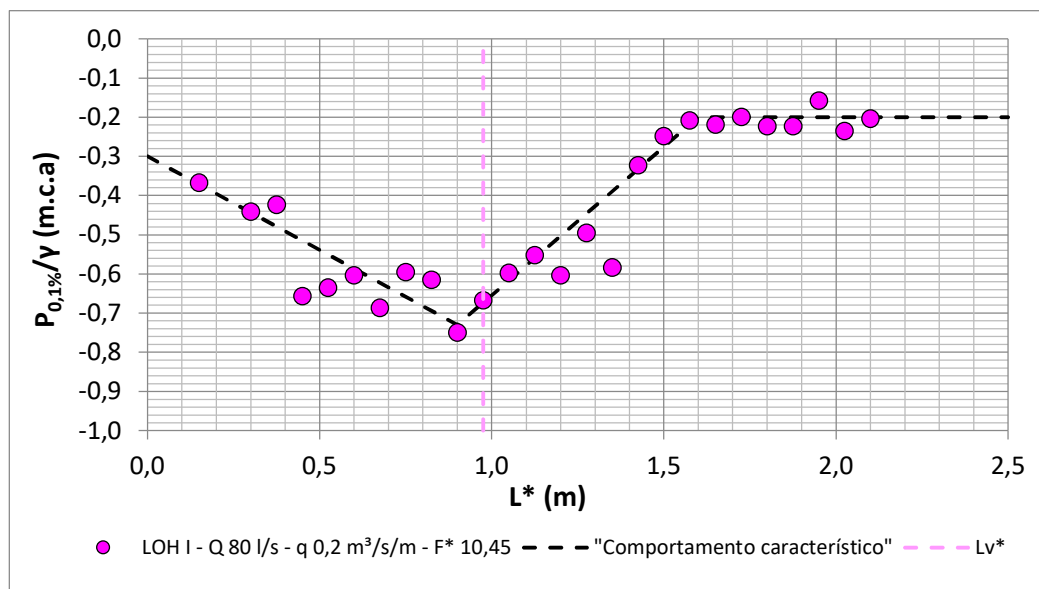
Apesar dos benefícios proporcionados pelos vertedouros em degraus, como a dissipação de energia ao longo da calha, alguns problemas podem surgir durante a sua operação. As pressões extremas mínimas geradas pelas altas velocidades de escoamento junto às quinas dos degraus podem produzir fenômenos de erosão e/ou cavitação ao longo da calha, prejudicando a integridade da estrutura. Com isso, aumentam-se os custos com manutenção, além de reduzir a segurança estrutural do empreendimento. Quintela (1980) afirma que o número de aproveitamentos hidráulicos com danos pela ação de cavitação é relativamente alto, sendo uma das principais responsáveis a ocorrência de pressões negativas.

A cavitação é o fenômeno hidráulico em que há formação de bolhas de vapor no líquido devido à redução de pressões do fluido até um valor crítico, sem que haja mudança de temperatura no líquido (KEMPKA, 2014). Quando estas bolhas implodem na superfície do concreto, podem gerar danos por cavitação.

Assim, é necessário identificar, ao longo da calha, os locais onde ocorrem as pressões mínimas e qual a estimativa do seu valor, para se inferir se podem ocorrer danos por cavitação sobre a superfície dos degraus. Diversos autores, como Tozzi (1992), Amador et al. (2004), Gomes (2006), Amador et al. (2009), Daneshfaraz et al. (2016), Osmar (2016), Novakoski et al. (2018), Endres et al. (2019) e Canellas (2020), entre outros, buscaram caracterizar o desenvolvimento das pressões ao longo da calha de vertedouros em degraus. Os autores concordam que as menores pressões ocorrem na quina dos espelhos dos degraus e próximo da região de início de aeração.

Lopardo (2003) recomenda que para a observação de pressões mínimas extremas sejam utilizadas as pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência ( $P_{0,1\%/Y}$ ). Canellas (2020) apresentou a distribuição longitudinal destas pressões no espelho (Figura 1), onde observou que à medida que o comprimento da calha ( $L^*$ ) aumenta, os valores destas pressões diminuem até uma posição ( $L_{e^*0,1\%min}$ ), em que alcançam o seu valor mínimo ( $P_{0,1\%min}/\gamma$ ). A partir daí, a pressão aumenta até uma posição na calha ( $L_{en^*}$ ) onde passa a oscilar em torno de um valor médio ( $P_{0,1\%n}$ ).

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



Fonte: adaptado de Canellas, 2020.

Além de observar as pressões mínimas extremas, a determinação do ponto de início da aeração é importante no estudo do escoamento sobre vertedouros em degraus, pois marca o início da entrada de ar no fluxo, devido a camada limite ter atingido profundidade total da lâmina d'água.

Gomes (2006) e Osmar (2016) observaram que existe uma relação entre a posição onde ocorrem os menores valores das pressões extremas mínimas no espelho ( $L_{e^*0,1\%min}$ ) com a posição visual ( $L_v^*$ ) do início da aeração, uma vez que a posição de início da aeração ocorre nas proximidades de onde ocorrem a pressões mínimas junto as quinas dos espelhos.

Assim, este trabalho visa apresentar uma metodologia para definir as principais posições ao longo da calha:

- Posição de início de aeração visual inicial ( $L_v^*$ );
- Posição onde ocorre a menor pressão extrema mínima junto a quina do espelho ( $L_{e^*0,1\%min}$ );
- Posição a partir de onde a pressão extrema mínima passa a oscilar em torno de um valor médio constante ( $L_{en^*}$ ).

## MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do projeto de pesquisa e desenvolvimento “Análise da Macroturbulência em Vertedouros em Degraus com Pré-Aeração”, estabelecido entre o IPH/UFRGS e a Eletrobrás-FURNAS.

Os dados de pressão e vazão foram obtidos a partir de três modelos experimentais de vertedouro em degraus com características distintas, a partir do escoamento deslizante sobre turbilhões e com processo de aeração natural. Um dos modelos (LAHE) está instalado no Laboratório de Hidráulica Experimental, da Eletrobrás Furnas e os outros dois (LOH I e LOH II), alocados no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

A Tabela 1 reúne as principais características relacionadas aos modelos experimentais utilizados.

Tabela 1– Características dos modelos experimentais utilizados.

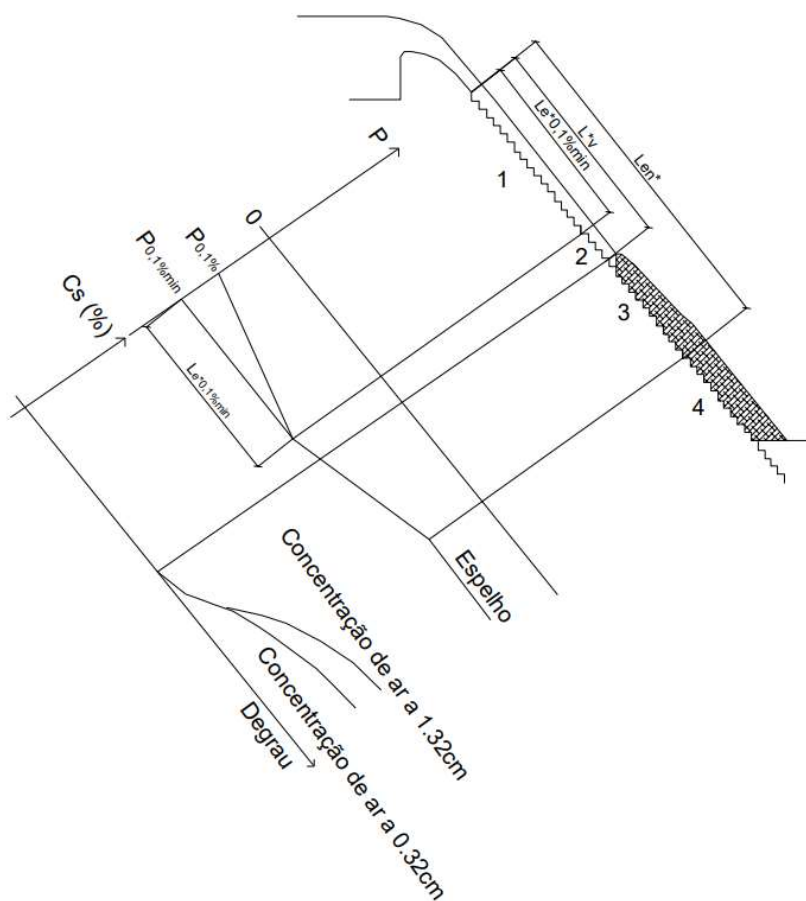
	LOH I	LOH II	LAHE
Altura degrau (m)	0,060	0,060	0,090
Profundidade Patamar (m)	0,0450	0,0450	0,0675
Altura da ogiva (m)	0,44	0,29	0,44
Largura da calha (m)	0,400	0,500	1,150
Declividade	1V:0,75H	1V:0,75H	1V:0,75H
Vazões (m <sup>3</sup> /s/m)	0,100 - 0,400	0,050 - 0,440	0,100 - 0,400
Número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha	5,23 - 19,20	2,82 - 22,79	2,84 - 10,11

Fonte: adaptado de Canellas (2020).

Para a obtenção das pressões foram instalados transdutores nas proximidades das quinas dos degraus, na linha central da calha. As tomadas de pressão foram conectadas aos transdutores através de mangueiras de náilon com 23 cm de comprimento e 3 mm de diâmetro interno, conforme orientações de Prestes (2019). O tempo de 10 minutos e a frequência de 100 Hz na aquisição dos dados seguem as premissas indicadas por Lopardo (1987).

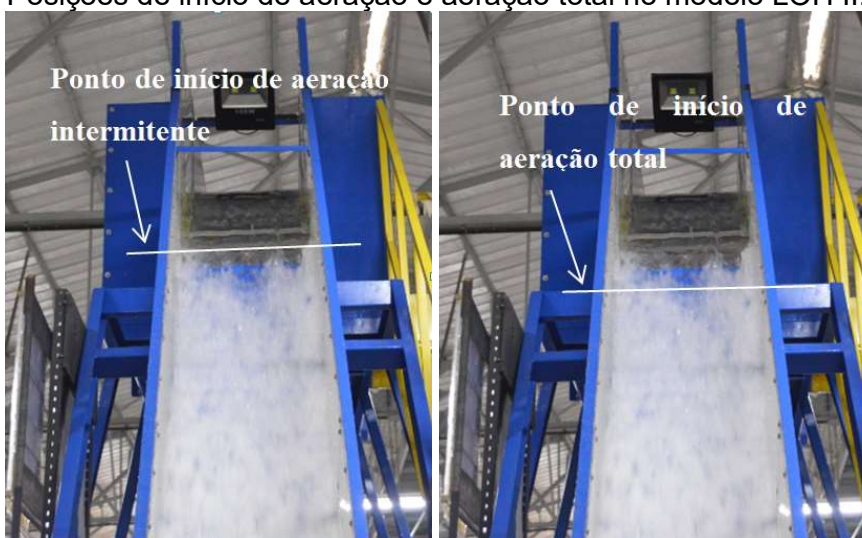
Para determinar os pontos críticos de cavitação relacionados a aeração, foi observada a literatura para o escoamento deslizante sobre turbilhões. Segundo Matos (1999), no início do trecho 2 da Figura 2 ocorre o afloramento da camada limite, denominada ponto de início de aeração, onde segundo Gomes (2006), Osmar (2016) e Canellas (2020) devem ocorrer as menores pressões extremas. No percurso do trecho 2, ocorre o início da entrada de ar no escoamento. No trecho 3, o ar incorporado se estende por todo o escoamento gradualmente variado e os vórtices no interior dos degraus podem ser facilmente identificáveis. No trecho 4, o escoamento está completamente desenvolvido, com características de um escoamento uniforme onde a profundidade, a velocidade, as pressões e a concentração de ar podem ser consideradas constantes.

Figura 2 – Representação esquemática do perfil longitudinal e padrão do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus.



A posição de início da aeração ( $L^*_v$ ) pode ser identificada visualmente, ainda que a precisão desta identificação seja prejudicada pela dinâmica do escoamento. Os comportamentos relacionados à posição de início de aeração do escoamento e ao início de aeração total foram realizados através de observação visual e análise de imagens, conforme orientado por Priebe (2020) e apresentado na Figura 3. Assim, diz-se que o início da aeração do escoamento corresponde ao ponto em que o ar começa a ser inserido no escoamento em pontos esparsos da largura da calha e que, a aeração total corresponde ao local em que a aeração ocorre na totalidade da largura da calha.

Figura 3 –Posições de início de aeração e aeração total no modelo LOH II.



Fonte: adaptado de Canellas (2020).

A análise do fenômeno foi realizada a partir do início dos degraus ( $L^*$ ), desprezando a parte da ogiva, uma vez que a sua influência não é significativa quando comparada às rugosidades da ogiva lisa com a macrorrugosidade proporcionada pelos degraus. (CANELLAS, 2020)

Para validar o estudo realizado foram utilizados também os dados de Matos (1999), Povh (2000), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Amador (2005) e Conterato (2011). Os dados dos autores foram utilizados para a verificação das tendências de comportamento das características dos pontos de aeração visual inicial e total e de menor pressão mínima extrema nos três modelos (considerada aquela pressão com probabilidade de não excedência de 0,1%). Na Tabela 2 são apresentados os dados dos modelos de vertedouro em degraus dos autores acima citados.

Tabela 2 – Informações dos modelos utilizados pelos autores inseridos na validação do estudo.

	Altura de grau (cm)	Profundidade Patamar (cm)	Altura da ogiva (cm)	Largura da calha (cm)	Declividade	q (m <sup>3</sup> /s/m)	Fr*
Matos (1999)	8	-	-	-	53.13	0.08 - 0.20	6.96 - 15.187
Povh (2000)	6	7.5	-	-	53.13	-	8.68 - 44.81
Sanagiotto (2003)	6	7.5	44	40	53.13	0.02 - 0.7	2.6 - 36.6
	9	11.3					1.4 - 19.9
Dai Prá (2004)	6	8.5	44	40	45	0.02	1.0 - 28.5
	9	12.7					0.6 - 15.5
Amador (2005)	7	9	Escalonada	60	51.38	0.5 - 0.33	1.9 - 13.1
UHE Dona Francisca	60	75	820	33500	53.13	-	-
Conterato (2011)	6	7.5	44	40	53.13	0.1 - 0.27	5.2 - 14.3

Fonte: elaborado pela autora.

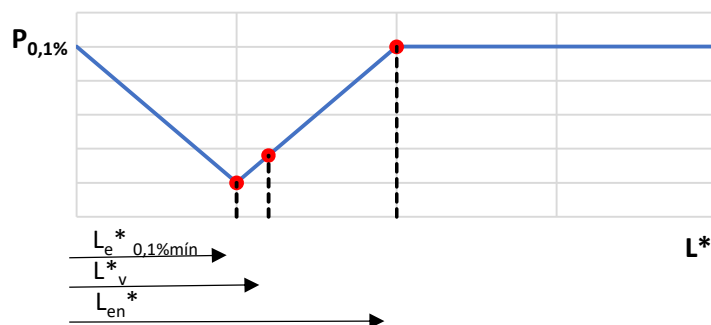
A base do presente estudo está apoiada nos dados dos três modelos em operação na pesquisa (LOH I, LOH II e LAHE).

Os dados obtidos possibilitaram determinar o comportamento das pressões ao longo da calha e identificar os pontos característicos da distribuição longitudinal das pressões (Figura 4):

- Comprimento de aeração visual inicial ( $L_v^*$ );
- Comprimento de menor pressão mínima extrema ( $L_{e^*0,1\%mín}$ ); e
- Comprimento de pressão mínima extrema estabilizada ou de aeração total ( $L_{en}^*$ ).



Figura 4 - Comportamento característico da distribuição longitudinal das pressões extremas mínimas ( $P_{0,1\%/\gamma}$ ) em função de  $L^*$ .



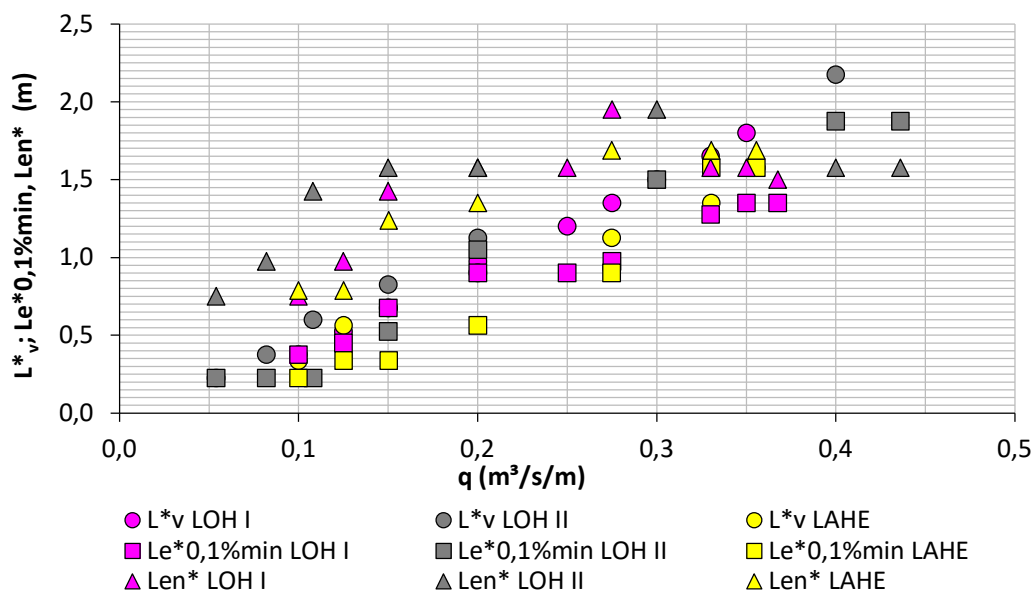
Fonte: elaborada pela autora.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados brutos das posições estudadas de aeração visual inicial, menor pressão mínima extrema e aeração total para os três modelos (LOH I, LOH II e LAHE) estão apresentados na Figura 5.

Observa-se que, para uma mesma vazão, o comprimento de aeração é muito próximo quando a altura dos degraus é a mesma e o comprimento de aeração é menor quanto maior for a altura do degrau. Ainda, percebe-se que o comprimento de aeração visual inicial e o comprimento de menor pressão mínima extrema ocorrem muito próximos, confirmando os estudos de Gomes (2006) e Osmar (2016).

Figura 5 - Posições de início de aeração por determinação visual desconsiderando a extensão da ogiva, menor pressão mínima extrema e aeração total.



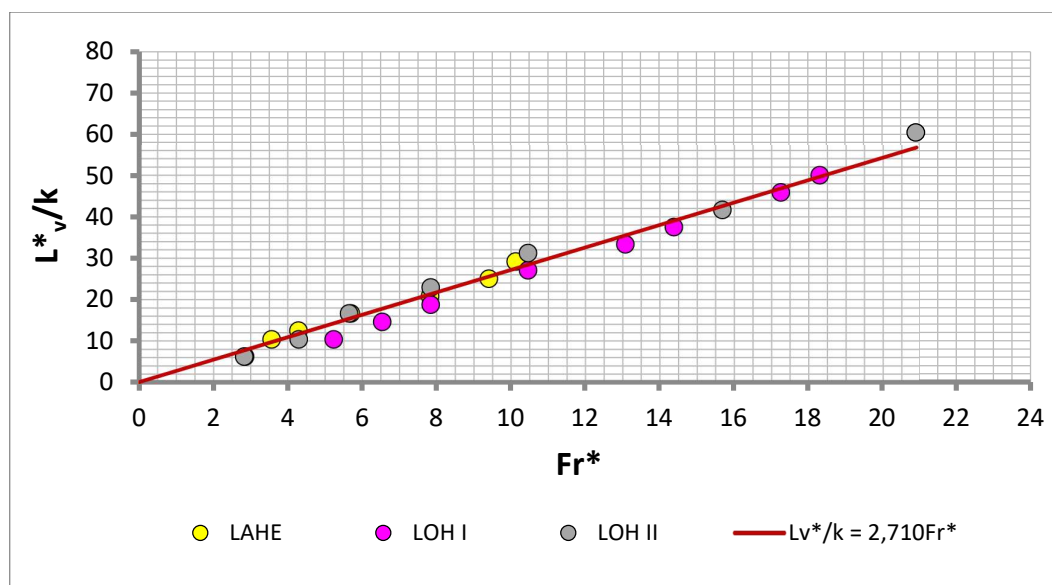
Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 6 apresenta a posição do início da aeração a partir do início dos degraus adimensionalizados em função da rugosidade do degrau ( $k$ ) e do número de Froude expresso em termos de altura de rugosidade ( $F_r^*$ ). Observa-se que o início da aeração cresce de forma linear com o aumento do número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha e que  $L^*v$  pode ser estimado, considerando a reta passando pela origem dos eixos, pela Equação 1:

$$\frac{L^*v}{k} = 2,710 \cdot F_r^* \quad (1)$$

$$R^2 = 0,98$$

Figura 6 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus adimensionalizada.



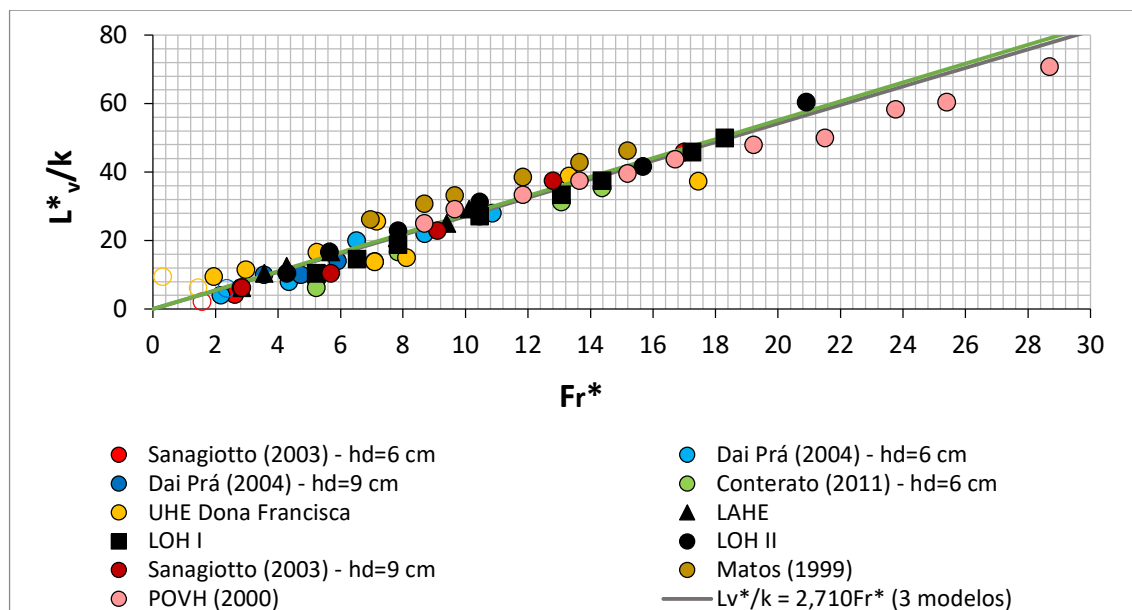
Fonte: elaborada pela autora.

Utilizando os dados obtidos por Matos (1999), Povh (2000), Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Amador (2005), Gomes (2006) e Conterato (2011), apresentados na metodologia, a relação adimensional obtida  $L^*v/k$  em função do número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha, torna-se compatível com o comportamento apresentado para os dados dos três modelos experimentais, apresentando uma diferença de  $\leq 2\%$  na média (Figura 7). A equação obtida para o conjunto de dados obtidos e combinada aos dados dos autores apresentados, passando pela origem dos eixos, é dada pela Equação 2:

$$\frac{L^*v}{k} = 2,758 \cdot Fr^* \quad (2)$$

$$R^2 = 0,76$$

Figura 7 - Posição do início da aeração por determinação visual a partir do início dos degraus adimensionalizada para todos os autores.



Fonte: elaborada pelos autores.

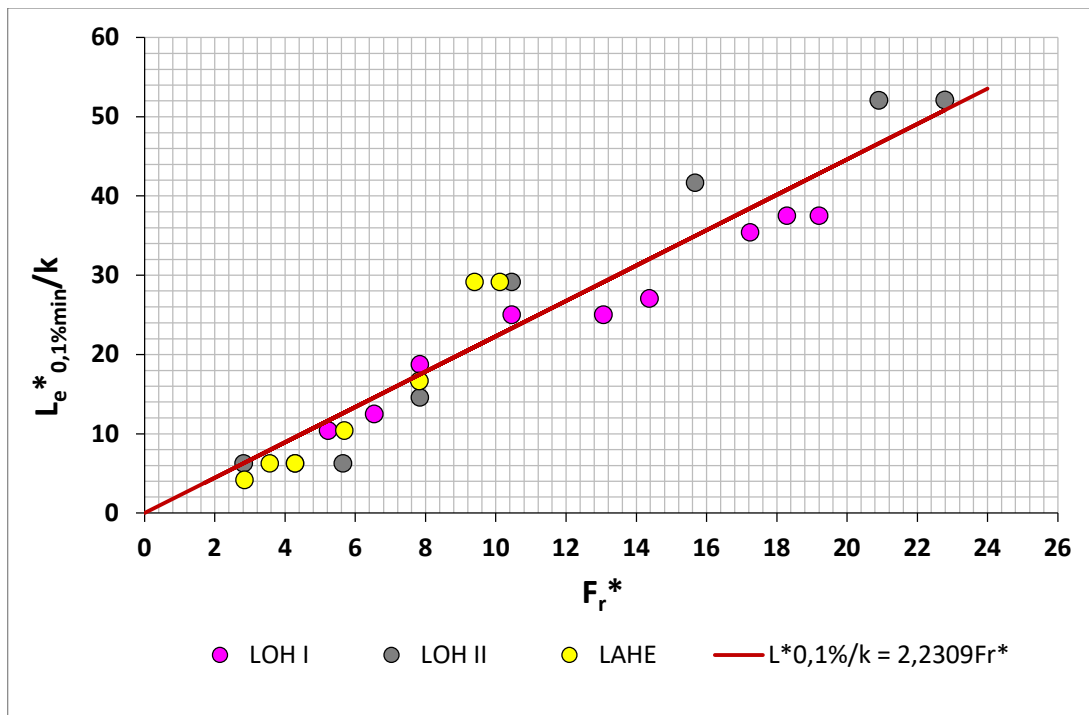
As eventuais diferenças apresentadas entre a reta obtida para os três modelos experimentais e a reta obtida para os dados dos demais autores ocorrem devido aos diversos critérios visuais utilizados pelos pesquisadores para determinar o início de aeração. Associam-se também ao fato de que foram apresentados dados de protótipo, obtidos para a Usina Hidrelétrica de Dona Francisca, que podem apresentar efeitos de escala. Também devem ser consideradas as interferências das diferentes alturas de degraus, escalas e inclinações dos modelos experimentais utilizados. É observado também que POVH (2000) apresenta os maiores valores de Froude expresso em termos de rugosidade da calha e que, apesar de os dados se afastarem da reta, ainda apresentam o mesmo comportamento dos dados com condições hidráulicas inferiores. Salienta-se que os pontos que apresentaram instabilidade na sua determinação não foram utilizados na equação e estão vazados na Figura 7.

Na Figura 8 são apresentados os resultados do comprimento de menor pressão mínima extrema ( $L_{e^*0,1\%min}$ ) adimensionalizados pela rugosidade do degrau em função do número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha. Assim, o adimensional apresentado, que cresce linearmente ao aumento do número de  $Fr^*$ , considerando a reta passando pela origem dos eixos, é obtido pela Equação 3:

$$\frac{Le_{0,1\%min}^*}{k} = 2,2309 \cdot Fr^* \quad (3)$$

$$R^2 = 0,92$$

Figura 8 - Posição da menor pressão mínima extrema a partir do início dos degraus adimensionalizada.



Fonte: elaborada pelos autores.

Pode ser observado que a dispersão apresentada entre os dados aumentou, quando relacionada ao comprimento de aeração visual inicial. Esta diferença pode ser atribuída a efeitos de laboratório, como tamanho dos degraus, inclinação da calha, escala dos modelos, tamanho da tomada de pressão, medições em somente alguns degraus, precisão dos transdutores, dentre outros fatores.

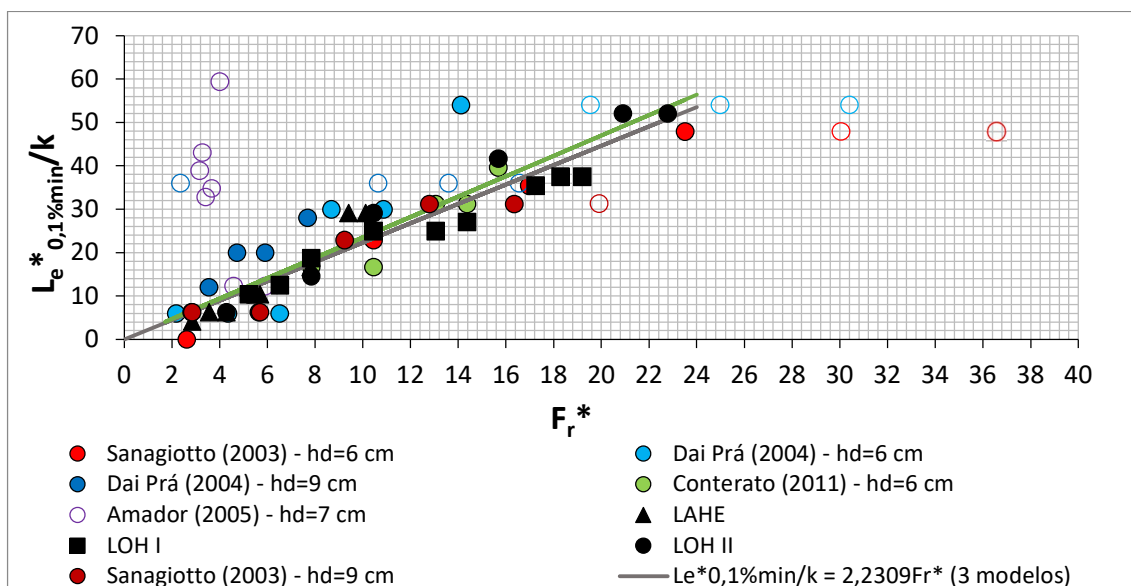
A Figura 9 apresenta características macroturbulentas em um vertedouro em degraus para a relação adimensional em função do número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha, comparadas com os resultados de Sanagiotto (2003), Dai Prá (2004), Amador (2005) e Conterato (2014) onde se pode observar que a diferença obtida é de  $\approx 3\%$ .

$$\frac{Le_{0,1\%min}^*}{k} = 2,349 \cdot Fr^* \quad (4)$$

$$R^2 = 0,76$$

A equação obtida e a reta apresentada na Figura 9 utilizaram somente os dados que passaram pelo valor mínimo de pressão.

Figura 9 - Posição da menor pressão mínima extrema a partir do início dos degraus adimensionalizada para todos os autores.



Fonte: elaborada pelos autores.

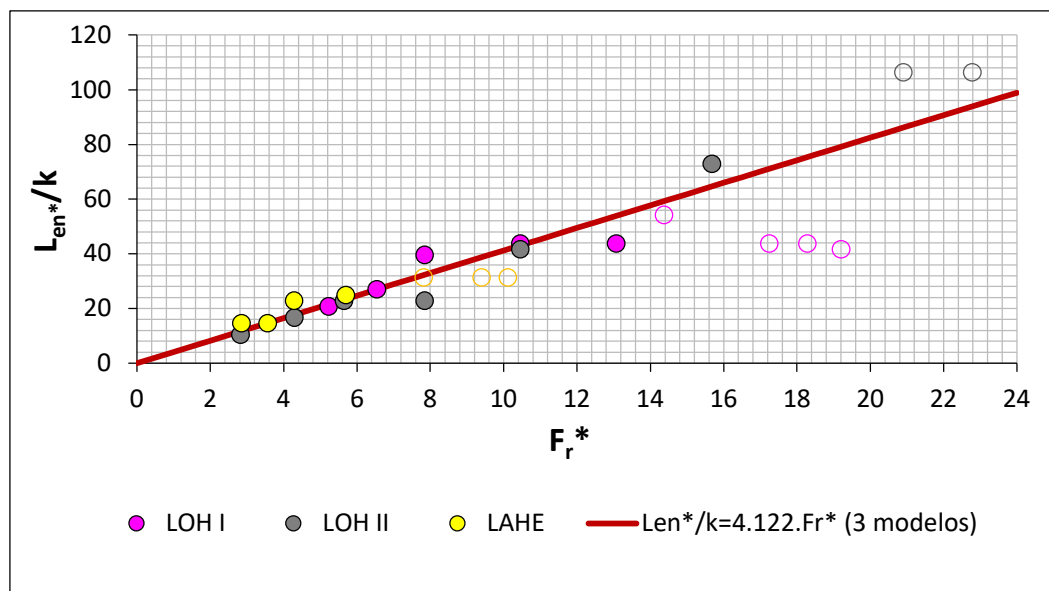
Observa-se, na Figura 9, que a dispersão na adimensionalização cresceu ainda mais quando os dados obtidos pelos modelos experimentais foram validados com os dados obtidos por diferentes pesquisadores. Isso deve-se ao fato de que há faixas de vazões utilizadas que não apresentaram o menor valor de pressão no desenvolvimento da calha, pois a mesma não possuía comprimento suficiente para que tal valor mínimo fosse atingido. Os dados não hachurados indicam, então, estes pontos que não se tem informação do menor valor de pressão e são os que apresentam a maior dispersão. Além disso, pode-se identificar efeitos de laboratório dados por diferenças geométricas e de definição de ensaio. Apesar disso, os dados apresentam a mesma tendência de desenvolvimento em função dos adimensionais utilizados.

De maneira análoga às outras posições características, se fez a análise da posição onde a pressão extrema mínima passa a ser constante e tem-se a aeração total do escoamento. A Figura 10 apresenta a adimensionalização das posições ( $L_{en}^*$ ) onde a pressão extrema mínima passa a ser constante em função do número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha do vertedouro com a inclusão dos dados de outros autores. A estimativa desta posição pode ser feita pela equação 5.

$$\frac{L_{en}^*}{k} = 4,122 \cdot Fr^* \quad (5)$$

$R^2 = 0,90$

Figura 10 - Posição da estabilização das pressões mínimas extremas ou aeração total a partir do início dos degraus ( $L_{en}^*$ ) adimensionalizada.



Fonte: elaborada pelos autores.

Observa-se que a dispersão na adimensionalização aumentou significativamente para as maiores vazões ao se comparar com os dados obtidos para a validação de  $L_{v}^*/k$  e  $L_{e^*P0,1\%min}/k$ . Vazões grandes justificam maior instabilidade na posição de início de aeração e isso explica o aumento na dispersão para vazões maiores. No entanto, a tendência obtida tanto para os três modelos utilizados neste ensaio, quanto para os dados dos demais autores, teve o mesmo comportamento, onde o comprimento adimensionalizado cresce com o acréscimo do Froude expresso em termos de rugosidade da calha. As diferenças são atribuídas aos efeitos de

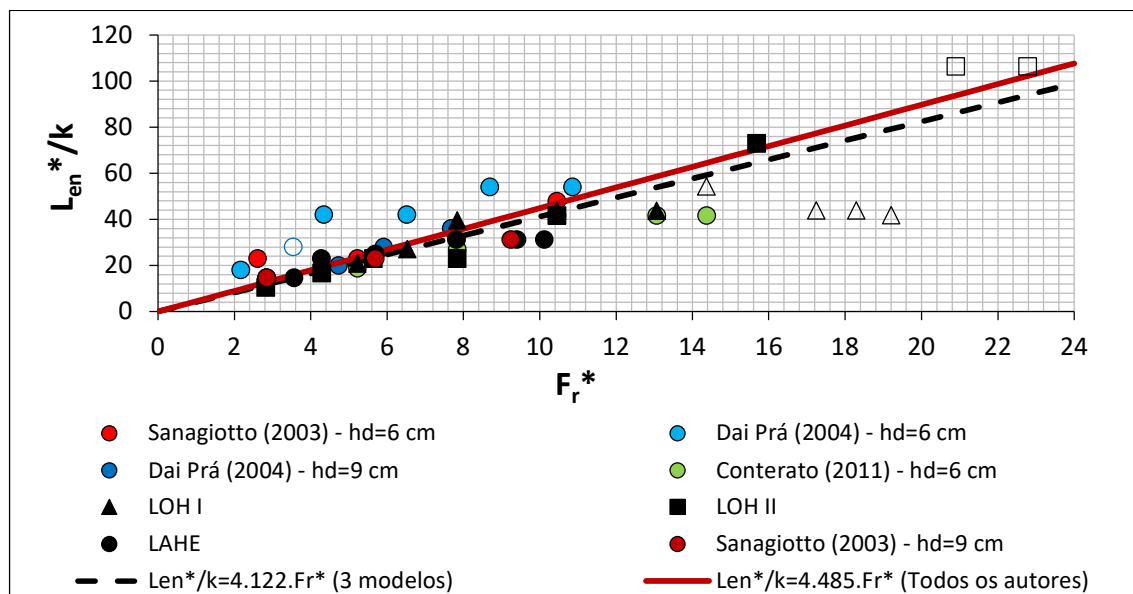
laboratório e aos dados que não apresentaram a completa estabilização no momento das leituras.

A equação e a reta apresentadas na Figura 11 utilizaram somente os dados dos autores em que foi possível indicar a pressão constante ao longo da calha. Os dados vazados indicam os pontos em que não foram observados este comportamento. A Equação 6 que passa pela origem dos eixos foi obtida:

$$\frac{L_{en}^*}{k} = 4,485 \cdot F_r^* \quad (6)$$

$$R^2 = 0,29$$

Figura 11 - Posição da estabilização das pressões mínimas extremas a partir do início dos degraus ( $L_{en}^*$ ) adimensionalizada para todos os autores.



Fonte: elaborada pelos autores.

Como observado por Gomes (2006), Osmar (2016), os pontos de aeração visual inicial e de menor pressão mínima extrema ocorrem muito próximos uns dos outros, sugerindo e permitindo uma comparação entre estas características estudadas. Na Figura 12, observa-se que os comprimentos característicos de  $L_v^*$  e  $L_{e^*0,1\%mín}$  apresentam valores muito próximos para  $F_r^* \leq 10$ . A partir de  $F_r^* > 10$ , os valores, apesar de ainda serem muito próximos, apresentam um distanciamento



maior. Isso ocorre porque vazões altas apresentam maior instabilidade na posição de início de aeração, ocasionando uma faixa maior de zonas de baixa pressão.

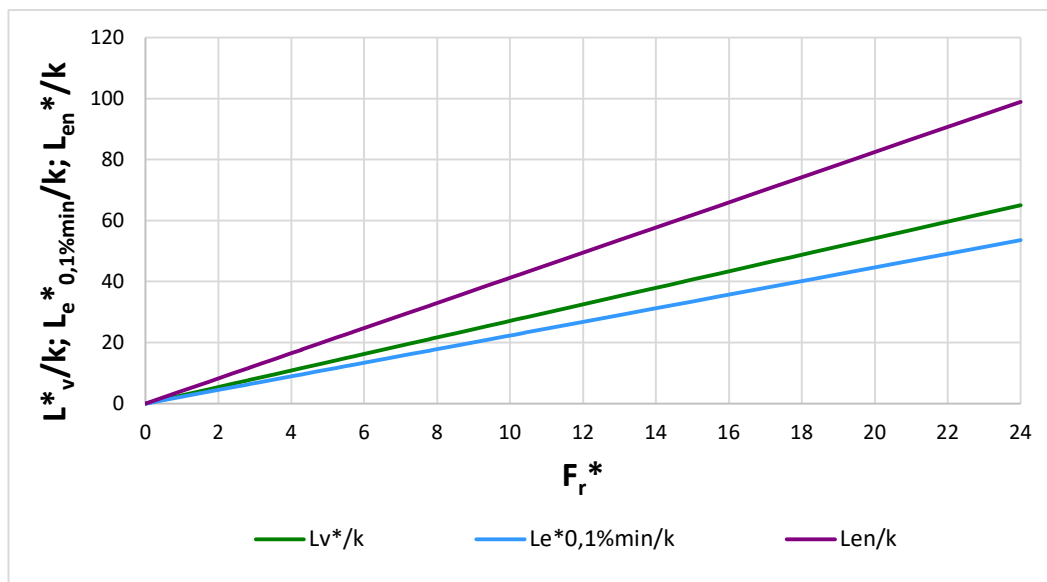
O mesmo ocorre para a posição onde as pressões mínimas oscilam entorno de um valor constante ( $L_{en}^*$ ), onde a partir de  $Fr^* > 10$  se verifica um comprimento maior para estabilização das pressões.

Estas relações dos comprimentos críticos observados podem ser representadas por relações com o parâmetro de identificação visual ( $L_v^*$ ), tornando mais acessível a identificação dos comprimentos críticos. A Equações 7 e 8 apresentam estas relações.

$$\frac{Le_{0,1\%min}^*}{L^*v} = 0,82 \approx 0,8 \quad (7)$$

$$\frac{Le_n^*}{L^*v} = 1,52 \approx 1,50 \quad (8)$$

Figura 12 – Comparação entre as retas obtidas através das equações adimensionais de aeração visual inicial, menor pressão mínima extrema e aeração total.



Fonte: elaborada pelos autores.

## CONCLUSÃO

Os comprimentos de início de aeração, de menor pressão mínima extrema e de pressão mínima extrema constante são primordiais para o estudo das características em vertedouros em degraus, pois são pontos de interesse na ocorrência de fenômenos físicos. O início de aeração delimita o início da entrada de ar no escoamento, que é importante para a proteção dos degraus contra a cavitação, porém apresenta instabilidade na forma de picos de pressão negativa, por isso ocorre tão próxima ao menor valor de pressão mínima extrema, ligada ao fenômeno de cavitação. Já o local onde ocorre a estabilização das pressões mínimas extremas caracteriza-se pela completa aeração do escoamento, permitindo que o ar incorporado ao escoamento proteja os degraus dos efeitos provocados pelo fenômeno de cavitação.

A partir do comportamento das pressões nas quinas dos espelhos dos degraus, foi possível apresentar equações que determinem, em função da rugosidade da calha e do número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha (desconsiderando a ogiva, dada sua pouca importância no desenvolvimento da camada limite):

- O comprimento de início de aeração ( $L_v^*$ );
- O comprimento de menor pressão mínima extrema ( $L_{e^*0,1\%min}$ ); e
- O comprimento de estabilização das pressões mínimas extremas ou de aeração total ( $L_{en^*}$ ).

Ainda foi possível estabelecer relações de grandeza entre os pontos de menor pressão mínima extrema e início de aeração visual inicial, observando que estas se relacionam muito próximas em um  $F_r^* \leq 10$  e que, em  $F_r^* > 10$ , os valores tendem a se afastar devido a maior instabilidade da posição de início de aeração dada pelo acréscimo de vazão. Assim, obteve-se uma relação entre a menor pressão mínima extrema e de início de aeração visual de 0,8.

O mesmo acréscimo de dispersão a partir de  $F_r^* > 10$  pôde ser verificado entre o início de aeração visual e os pontos onde as pressões mínimas oscila entorno de um valor constante. Assim, pôde-se verificar que o comprimento de aeração visual inicial ocorre 1,5 vezes anterior a posição onde as pressões mínimas oscilam em um valor constante.

## AGRADECIMENTOS

Agradecimentos especiais ao Laboratório de Obras Hidráulicas, onde foram realizadas as leituras, e toda a equipe que o compõe, desde bolsistas da graduação, a mestrandos, doutorandos e aos professores (principalmente meus orientadores Maurício Dai Prá e Marcelo Giulian Marques, essenciais para o desenvolvimento do trabalho). Agradecimentos à Furnas Centrais Elétricas pelo investimento nas pesquisas da UFRGS e, principalmente, neste projeto.

## REFERÊNCIAS

AMADOR, A. Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de hormigón compactado. Tese de doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2005.

CANELLAS, A.V.B. Pressões extremas atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

CONTERATO, E. Escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Declividade 1V:0,75H: Caracterização das Pressões e condições de aeração. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

DANESHFARAZ, R.; JOUDI, A.R.; GHARAMANZADEH, A.; GHADERI, A. Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. *Advances and Applications in Fluid Mechanics*. Pushpa Publishing House, Allahabad, India, 2016.

DAI PRÁ, M. Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. 2004. 134 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2004.

ENDRES, L.A.M.; SCHUMACHER, A.; CANELLAS, A.V.B.; DA SILVA, F.A. Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus. XXXII Seminário Nacional de Grande Barragens. Salvador, BA, Brasil. 2019.

GOMES, J. Campo de Pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

KEMPKA, M.; Estimativa da Distribuição Longitudinal das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida. 2014. 120f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 2014.

LOPARDO, R. A. Cavitación em fluxos macroturbulentos, *Matematicae Notae*, UNR Editora, Rosário, Argentina, Ano XLII, v.2, p.19-40, 2003.

LOPARDO, R. A.; HENNING, R. E. Efectos de lãs condiciones de ingresso al ressalto sobre el campo de pressiones instantâneas. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 12.,1986, São Paulo, Brasil. Anais ... São Paulo: IAHR, 1986. v.1 p. 116-127.

NOVAKOSKI, C. K.; et al. Extreme negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways. III International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brasil, 2018.

OSMAR, F. M. Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

PRESTES, A.C. et al. Influência da utilização de diferentes comprimentos de condutos flexíveis em medições de pressão na calha de um vertedouro em degraus. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH). Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. 2019.

PRIEBE, P.S. Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M; Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ministério de Habilitação e Obras Públicas. Lisboa, 1980.

SANAGIOTTO, D.G. Características do escoamento sobre vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

## 6.2 DELIMITAÇÃO DE REGIÕES DE CAVITAÇÃO EM UM VERTEDOIRO EM DEGRAUS

### RESUMO

A dissipação de energia do escoamento ao longo da calha de vertedouros em degraus e a redução dos custos de construção e operação, tanto da estrutura quanto da bacia de dissipação, faz com que seu uso seja cada vez mais recorrente em barragens. Apesar dos benefícios obtidos na sua concepção, são verificados danos na superfície dos degraus devido a diversos fenômenos decorrentes da ação do escoamento, como a cavitação. Os danos causados pelo fenômeno podem obrigar o rebaixamento do nível normal da barragem ou mesmo parar sua operação totalmente para a execução dos reparos, gerando um custo maior na conta do consumidor final, além de pôr em risco as populações ribeirinhas a jusante. Assim, este artigo determina uma metodologia para identificar a ocorrência de cavitação e de possibilidade de danos por cavitação em um vertedouro em degraus, de maneira a permitir uma avaliação, ainda na fase de projeto, do que poderá ocorrer com a estrutura e, para as barragens existentes, quais são as condições de vertimento que poderão ocasionar danos na estrutura. Para isso, foram delimitadas três condições de risco de danos em função da carga hidráulica total e da vazão específica, sendo elas: região sem risco de cavitação, região sem ocorrência de dano por cavitação e região com possibilidade de dano por cavitação. A análise foi realizada a partir de equações de Canellas (2020) e Schumacher (em fase de elaboração) de previsão das pressões extremas mínimas junto às quinas dos espelhos e suas localizações, através das quais foi possível determinar as condições de risco para cada uma das regiões, em função das características geométricas (altura do degrau e altura do paramento) e hidráulicas (vazões específicas) da estrutura. Para a definição das regiões foram analisadas 4 alturas de degraus (0,30, 0,60, 0,90 e 1,2 m) e duas declividades de calha ( $45^\circ$  e  $53,13^\circ$ ) para diferentes vazões específicas. Esta análise permitiu identificar as regiões de cavitação e possibilidade de dano pelo fenômeno de cavitação em protótipos, além de observar que maiores degraus produzem o fenômeno de cavitação em cargas hidráulicas menores, enquanto as vazões se mantiveram indiferentes. Além disso, o acréscimo de vazão, de inclinação da calha e redução da altura dos degraus da calha

escalonada, faz com que o fenômeno apresente uma faixa mais extensa de possibilidade de dano.

## **ABSTRACT**

The energy dissipation of the flow along the stepped spillway and the reduction of construction and operation costs, makes the use of stepped spillway more recurrent in dams. Despite of these, damage can be seen on the surface of the steps because of a lot of phenomena occurring on the flow, just like cavitation. The damage caused by the phenomenon forces the lowering of the dam's normal level and stop the operation for the repairs. This causes a higher cost in the account of the final consumer and put the riverside populations downstream at risk. Thus, this article determines a methodology to identify the cavitation and the possibility of damage by cavitation in a stepped spillway, in order to allow an assessment at the design stage of what may happen to the structure and, for existing dams, what are the pouring conditions that may cause damage to the structure. For this purpose, three conditions of risk were defined according to the total hydraulic load and the specific flow: region without risk of cavitation and without damage by cavitation, region with occurrence of cavitation and without risk of damage, and region with the occurrence of cavitation and with risk of damage by cavitation. The analysis was made using equations to predict the minimum extreme pressures near the corners of the steps. This turns possible to determine the risk conditions for each of the regions, according to the geometric characteristics (step height and slope) and hydraulic (specific flows) of the structure. To define the regions, 4 step heights (0.30, 0.60, 0.90 and 1.2 m) and two slopes ( $45^\circ$  and  $53.13^\circ$ ) were analyzed for different specific flows. This analysis identified the regions of cavitation and the possibility of damage by the phenomenon of cavitation in prototypes. In addition, could be observed that higher steps produce the phenomenon of cavitation at lower heights, while the flow continued indifferent. The increase of flow, slope and the reduction height of the steps of stepped spillway make the phenomenon to present a more extensive range of possibility of damage.

## INTRODUÇÃO

A utilização de vertedouros em degraus tem expandido nas últimas décadas, devido a praticidade de sua construção e a dissipação de energia que proporciona ao longo da calha. Conterato (2014) cita que existem diversos fatores que conferem à estrutura esta última característica, como a altura e a declividade da calha escalonada.

Sabe-se que estas estruturas estão sujeitas a fluxos de altas velocidades e que isto pode gerar danos na superfície de concreto. Vieira e Gontijo (2011) confirmam que nas últimas três décadas, o número de estruturas hidráulicas danificadas por diferentes processos aumentou significativamente e que o desgaste é provocado, principalmente, por cavitação e tensões de cisalhamento.

Devido a rugosidade proporcionada pelos degraus durante o escoamento das altas velocidades, surgem zonas de baixa pressão na face vertical dos degraus, com a formação de bolhas de ar. Quando as pressões do líquido escoado diminuem ao ponto de atingir a pressão de vapor da água (-10,09 m.c.a., segundo Novakoski et al., 2018), ocorre a implosão das bolhas de ar formadas, o que caracteriza o fenômeno de cavitação. Estas implosões são capazes de gerar esforços por tração ou compressão na superfície hidráulica e, dependendo de sua intensidade e duração, podem causar danos.

Com o intuito de caracterizar as zonas de baixa pressão que ocorrem em vertedouros em degraus, Dai Prá (2004), Gomes (2006), Osmar (2016), Novakoski et al. (2018), Endres et al. (2019), Canellas (2020) estudaram a distribuição longitudinal das pressões ao longo de calhas em degraus, através de medições de pressões realizadas em modelos físicos (com alturas de degraus entre 3 cm a 9 cm e declividade de calhas de 1:1 e 1:0,75).

Fael e Pinheiro (2003) criaram uma relação empírica para o início do escoamento deslizante sobre turbilhões em vertedouros em degraus, a partir dos dados de Ohtsu e Yasua (1997), Matos (1999) e Fael (2000), dada pela Equação 1.

$$\frac{h_c}{h_d} = 0,824 \left( \frac{h_d}{h_L} \right)^{-0,227} \quad (1)$$

Onde:  $h_c$  – altura crítica do escoamento;  $h_d$  – altura de degrau;  $h_L$  – profundidade do degrau.

Schumacher (em fase de elaboração) estabelece equações que possibilitam determinar os comprimentos desde o primeiro degrau da calha até os pontos de menor pressão extrema mínima ( $Le_{0,1\%min}^*$ ), de inicial aeração visual ( $L_v^*$ ) e de aeração total ( $L_{en}^*$ ) baseados nos resultados de Canellas (2020), conforme as Equações 2, 3 e 4, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Equações propostas para comprimento de calha de um vertedouro em degraus.

Menor pressão mínima extrema	$\frac{Le_{0,1\%min}^*}{k} = 2,2309 \cdot Fr^*$	(2)
Aeração visual inicial	$\frac{L_v^*}{k} = 2,710 \cdot Fr^*$	(3)
Aeração total	$\frac{L_{en}^*}{k} = 4,122 \cdot Fr^*$	(4)

Fonte: adaptado de Schumacher (em fase de elaboração)

Onde:  $k$  – rugosidade dos degraus;  $Le_{0,1\%min}^*$  – comprimento desde o primeiro degrau até o ponto de menor pressão mínima extrema;  $Fr^*$  – número de Froude expresso em termos de rugosidade da calha;  $L_{en}^*$  – comprimento de aeração máxima a partir do primeiro degrau;  $L_v^*$  – comprimento de aeração visual inicial, a partir do primeiro degrau da calha.

A determinação dos comprimentos apresentados por Schumacher (em fase de elaboração) é explicada pelo fato de que, ao localizar o ponto de menor pressão mínima extrema na calha, a Equação 5, proposta por Canellas (2020), pode ser utilizada para identificar se a pressão mínima extrema atinja o valor da pressão de vapor da água, indicando o início do fenômeno de cavitação. Já as posições de aeração são fatores importantes para a proteção da superfície de concreto dos degraus.

$$\frac{\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma}\right) h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(Fr^*) - 0,5664 \quad (5)$$

Onde:  $P_{0,1\%min}$  – menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência;  $Z_{0,1\%min}$  – energia total a montante até o ponto de menor pressão mínima extrema;



Complementando as análises de proteção da superfície dos degraus apresentada por Schumacher (em fase de elaboração), também foram analisadas as investigações de Matos (1999), que demonstram que uma concentração de ar de 7 a 8% no fundo do escoamento é capaz de criar uma camada de proteção à superfície hidráulica contra os efeitos de cavitação. Para isso, o autor desenvolveu a Equação 6, capaz de determinar a porcentagem de concentração de ar próximo à superfície escalonada.

$$C_s = \frac{0,381}{\left(1 + \frac{s'}{14,189}\right)^{-1,2232}} \quad (6)$$

Onde:  $C_s$  – concentração média de ar no escoamento;  $s'$  – posição adimensional com valor 0 no ponto de início da aeração.

Os coeficientes adotados para delimitar a concentração de ar no contato da superfície hidráulica com o escoamento foram os localizados à 0,32 cm do fundo, pois é o local mais crítico observado pelo autor.

Assim, o objetivo deste trabalho é elaborar uma metodologia para identificar as regiões críticas relacionadas ao fenômeno de cavitação em vertedouros em degraus, integrando aspectos geométricos, hidráulicos e de aeração. Estas regiões, por fim, delimitam os locais suscetíveis ou não aos danos por cavitação. Com isso, pode-se aumentar a segurança do empreendimento e, conseqüentemente, diminuir a necessidade de manutenção da estrutura, proporcionando maior funcionalidade das barragens dotadas de vertedouros em degraus.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para desenvolver o trabalho foram delimitadas três condições de risco de danos:

- Região sem risco de cavitação;
- Região sem ocorrência de dano por cavitação, e
- Região com possibilidade de dano por cavitação.

Para a definição das regiões foram utilizadas equações de localização de menor pressão mínima extrema com 0,1% de probabilidade de não excedência de

Schumacher (em fase de elaboração), equações de identificação das pressões mínimas extremas de Canellas (2020) e de concentração de ar necessária para proteger os degraus contra os efeitos da cavitação de Matos (1999). Além disso, foram representadas as retas de menor pressão mínima extrema, aeração visual inicial, 8% de aeração e aeração total. Os coeficientes adotados para delimitar a concentração de ar no contato da superfície hidráulica com o escoamento foram os localizados à 0,32 cm do fundo, pois é o local mais crítico observado pelo autor. As equações utilizadas para determinar as regiões estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resumo das equações utilizadas.

Escoamento Deslizante sobre Turbilhões (Fael e Pinheiro, 2003)		$\frac{h_c}{h_d} = 0,824 \left(\frac{h_d}{h_L}\right)^{-0,227}$
Menor pressão extrema mínima	Posição (Schumacher, em fase de elaboração)	$\frac{L_{e0,1min}^*}{k} = 2,2309 * F_r^*$
	Menor Pressão extrema (Canellas, 2020)	$\left(\frac{P_{0,1\%min}}{\gamma}\right) \frac{h_d}{Z_{0,1\%min} h_c} = 0,1601 \ln(Fr^*) - 0,5664$
Estabilização das pressões/ Aeração total (Schumacher, em fase de elaboração)		$\frac{L_{en}^*}{k} = 4.122 * F_r^*$
Aeração Visual Inicial (Schumacher, em fase de elaboração)		$\frac{L_v^*}{k} = 2.710 * F_r^*$
8% de aeração a 0,32 cm do fundo (Matos, 1999)		$C_s = \frac{0,381}{\left(1 + \frac{s'}{14,189}\right)^{-1,2232}}$

Fonte: elaborada pela autora.

As condições geométricas analisadas, expressas em termos de dimensões em protótipo, foram:

- espelho do degrau ( $h_d$ ): 30, 60, 90 e 120 cm;
- inclinações ( $\theta$ ): 53,13° e 45°.

Estas características foram adotadas devido a sua grande recorrência em projetos de vertedouros em degraus de barragens, como é o caso da UHE de Dona Francisca, que possui altura de degraus de 60 cm e inclinação da calha de 53, 13°.

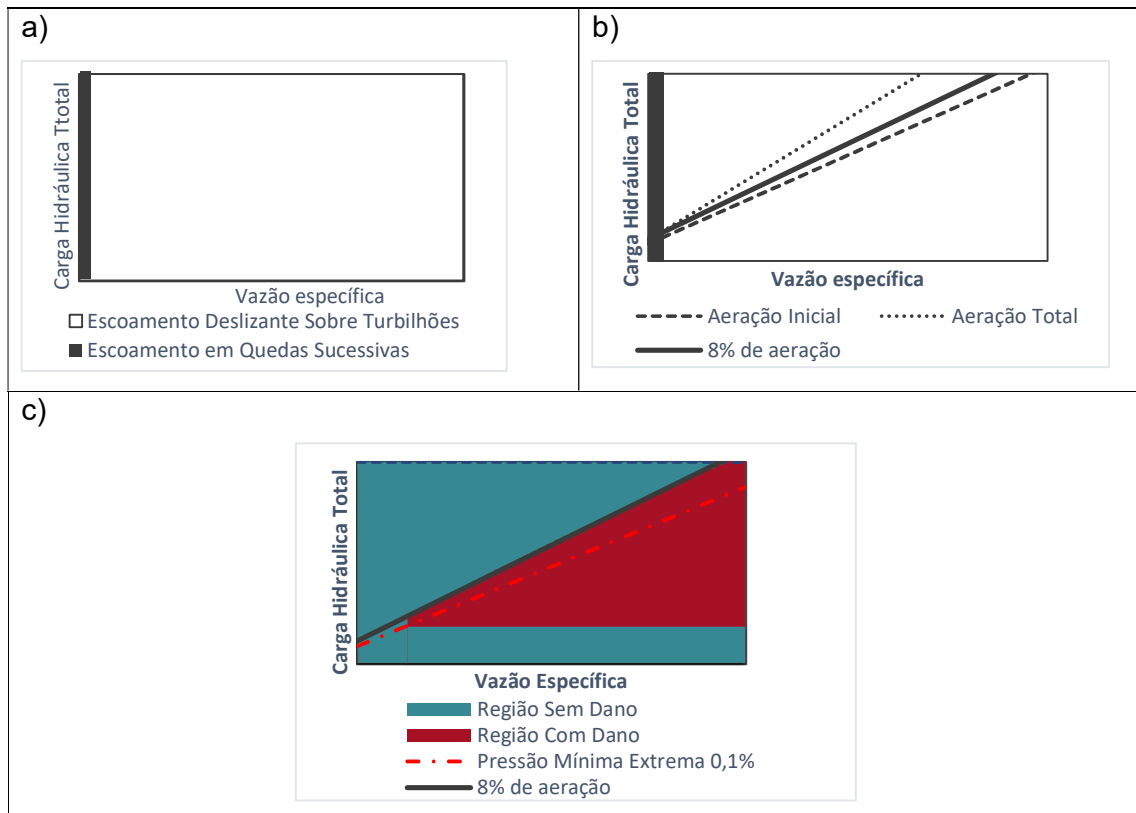
A elaboração das figuras que deu origem às regiões foi feita a partir de 4 etapas descritas abaixo, e ilustradas pela Figura 1:

- delimitação para o início do escoamento deslizante sobre turbilhões;

- b) delimitação dos pontos de aeração visual inicial e total, pois segundo Canellas (2020), o ponto de pressão mínima extrema ocorre ligeiramente antes do ponto de aeração visual inicial e o ponto de aeração total apresenta estabilização das pressões mínimas extremas. Delimitação do ponto de concentração de ar de 8% junto à calha, pois segundo Matos (1999) esta concentração pode evitar os danos por cavitação, quando  $s' < 6$ ); e
- c) delimitação da vazão específica a partir da qual começam ocorrer pressões extremas mínimas próximas à pressão de vapor, sendo considerada como  $P_{0,1\%}$  a pressão de vapor da água de -10,09 m.c.a., que desencadearia o processo de cavitação, a partir das metodologias propostas por Canellas (2020) e Schumacher (em fase de elaboração).

Deve-se ressaltar que na área azul (Regiões sem ocorrência de dano por cavitação) pode haver cavitação e quantidade de ar no fundo do escoamento suficiente para proteger os degraus da estrutura ou não ter cavitação devido ao aumento da pressão acima de -10,09 m.c.a.

Figura 1 – Regiões de cavitação e de danos em um vertedouro em degraus.



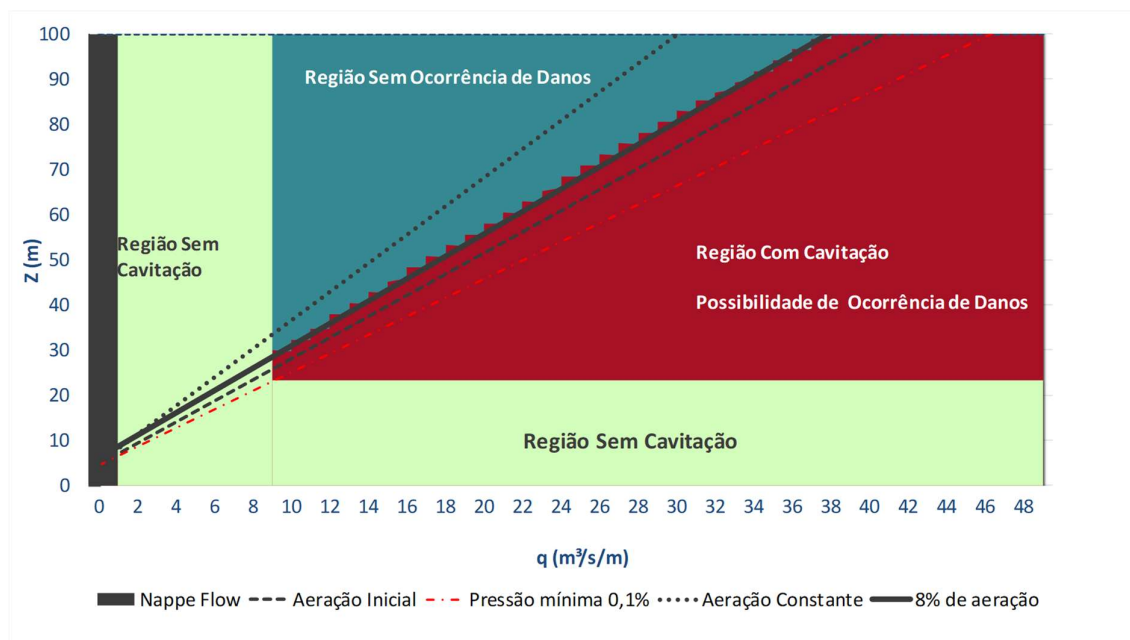
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com a metodologia proposta, a partir dos estudos de Fael e Pinheiro (2003), Matos (1999), Canellas (2020) e Schumacher (em fase de elaboração), e as condições de protótipo impostas, foram obtidas: i) região sem cavitação, ii) região sem ocorrência de dano por cavitação (seja ela devido a proteção dos degraus com 8% de aeração no fundo do canal ou retorno da pressão acima dos -10,09 mca); e iii) região com possibilidade de dano por cavitação.

As figuras 2, 3, 4 e 5 abordam calhas com  $45^\circ$  de inclinação e alturas de degraus de 30, 60, 90 e 120 cm, sendo considerada como  $P_{0,1\%}$  a pressão de vapor da água de -10,09 m.c.a., que desencadearia o processo de cavitação.

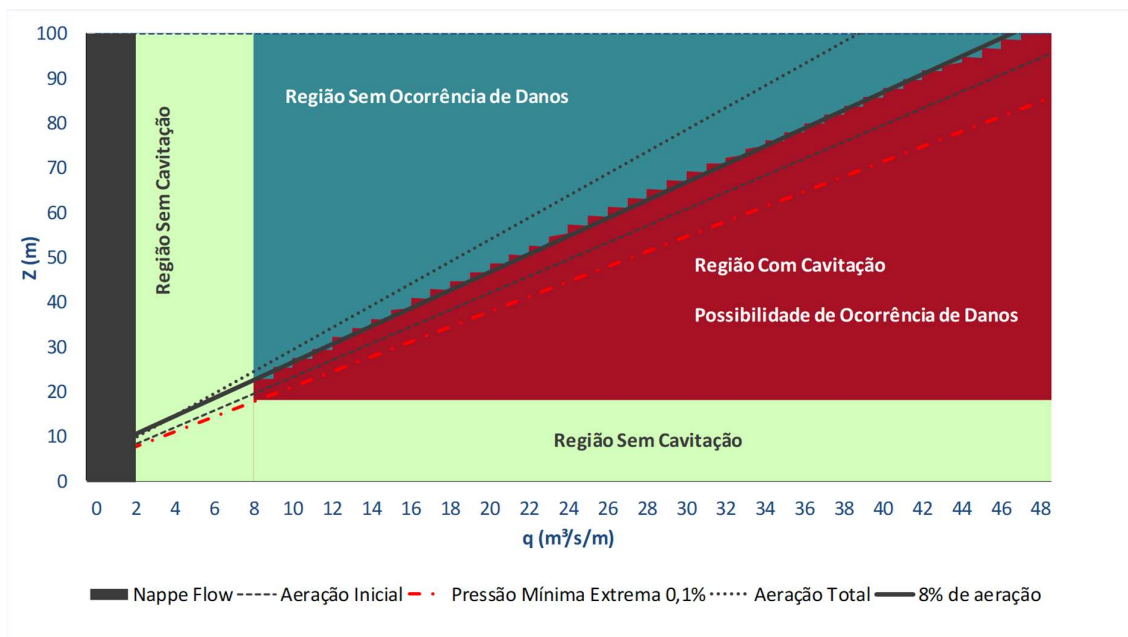
Já as figuras 6, 7, 8 e 9 abordam calhas com  $53,13^\circ$  de inclinação e alturas de degraus de 30, 60, 90 e 120 cm sendo considerada como  $P_{0,1\%}$  a pressão de vapor da água de -10,09 m.c.a., que desencadearia o processo de cavitação.

Figura 2 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 30$  cm,  $\theta = 45^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10,09$  m.c.a.



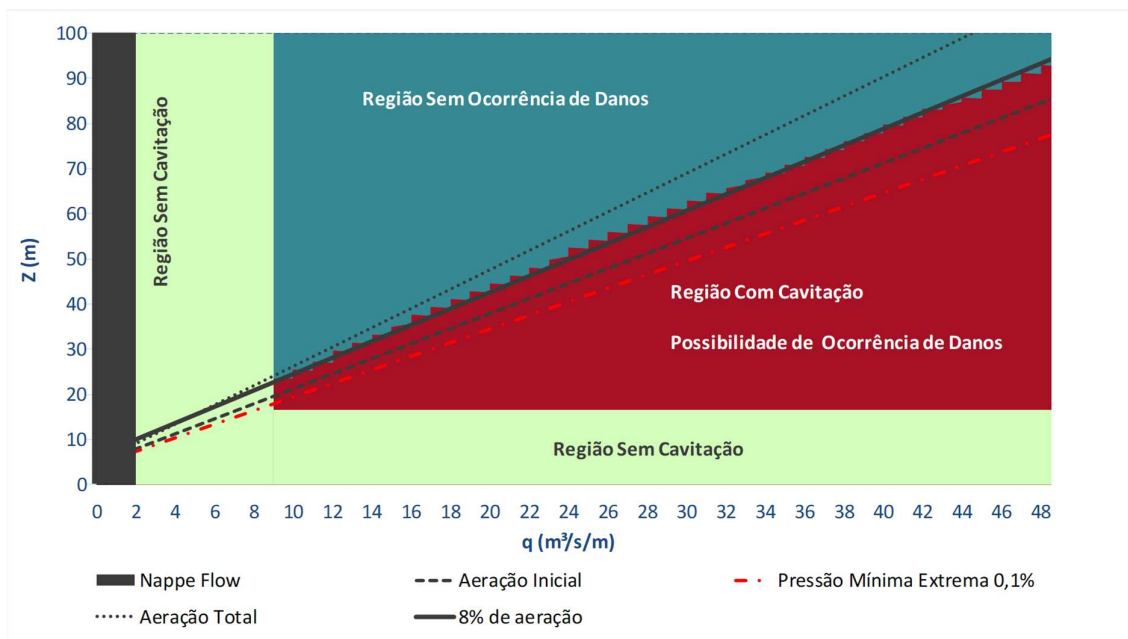
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 3 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 60$  cm,  $\theta = 45^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



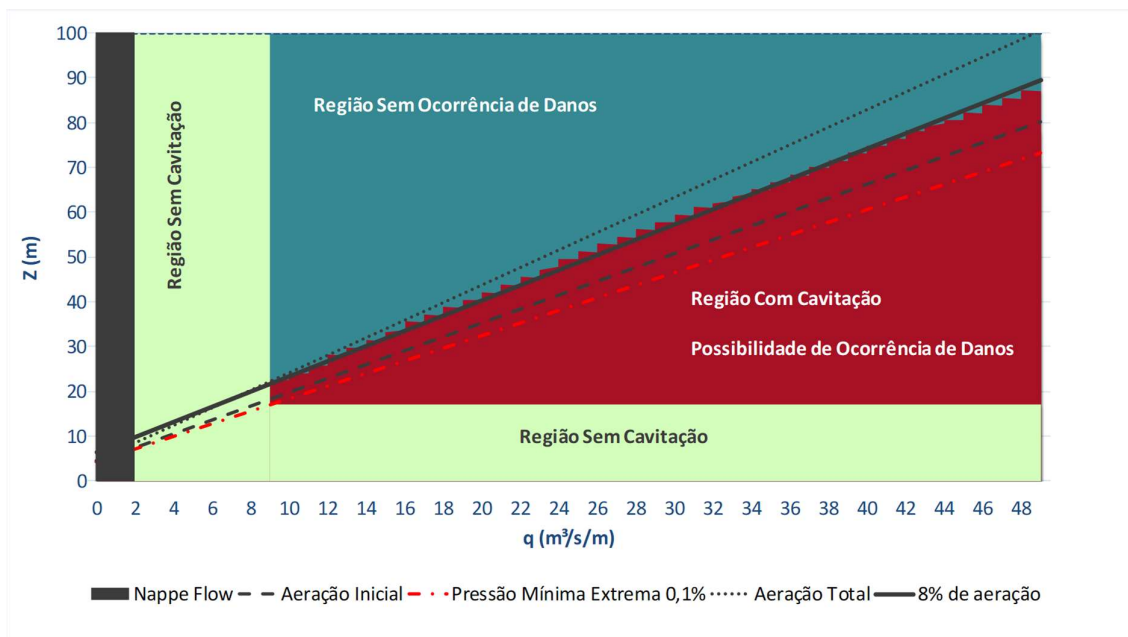
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 4 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 90$  cm,  $\theta = 45^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



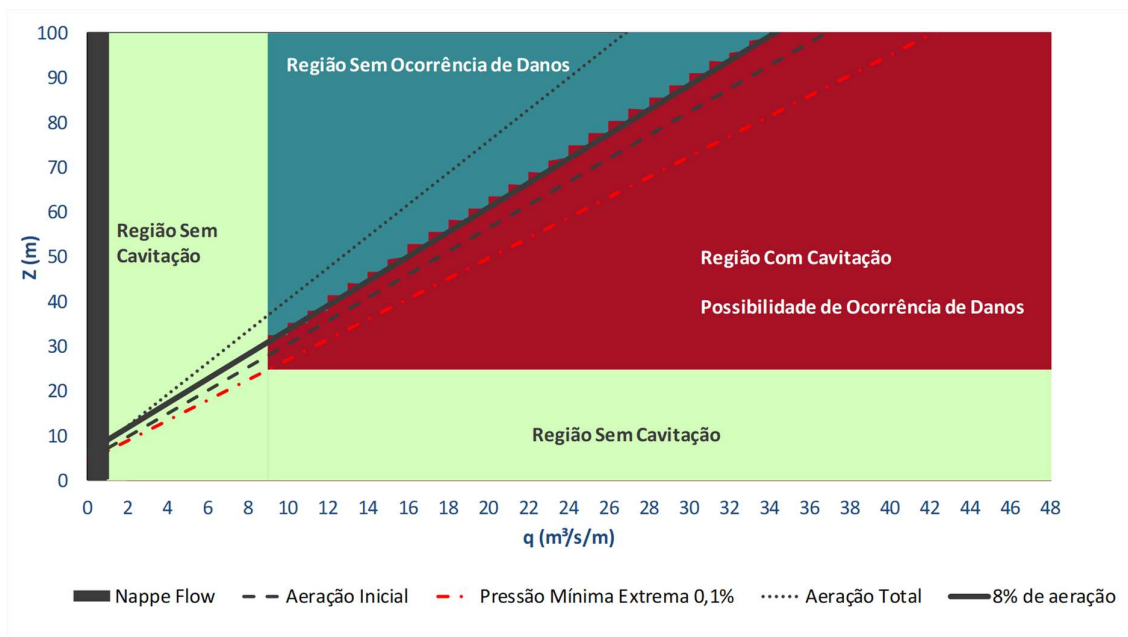
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 5 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 120$  cm,  $\theta = 45^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



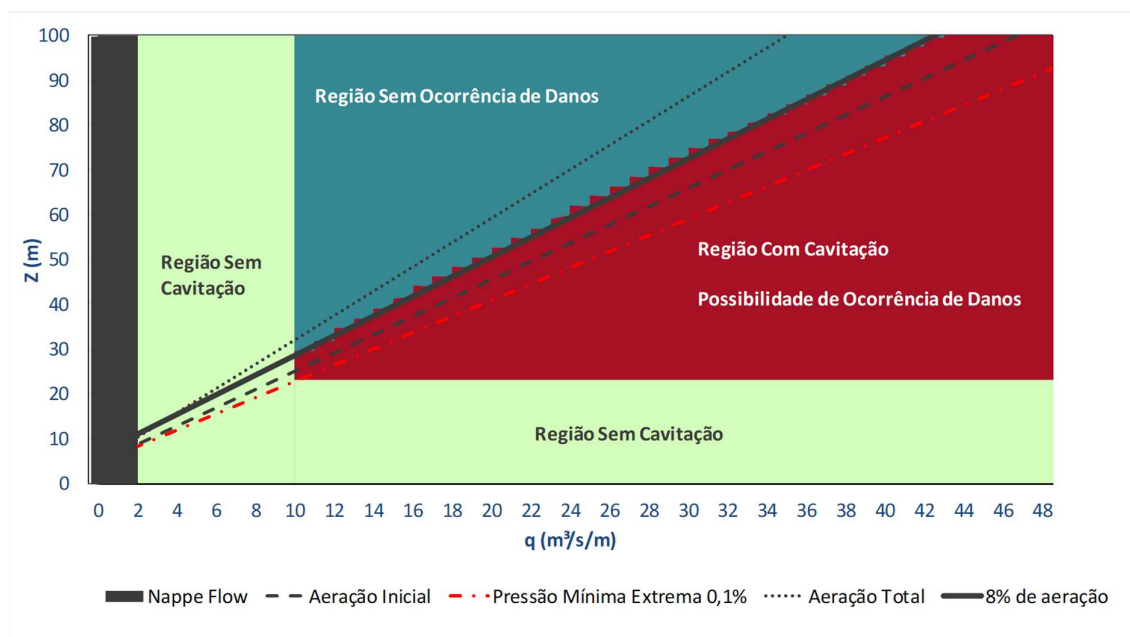
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 6 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 30$  cm,  $\theta = 53.13^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



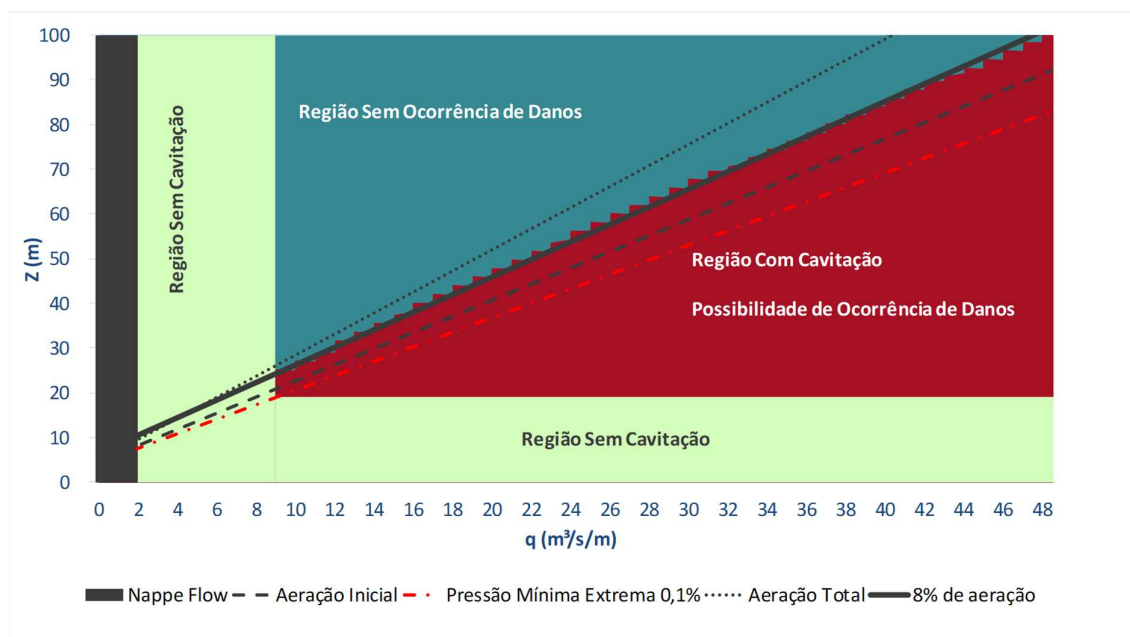
Fonte: elaborada pela autora.

Figura 7 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 60$  cm,  $\theta = 53.13^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



Fonte: elaborada pela autora.

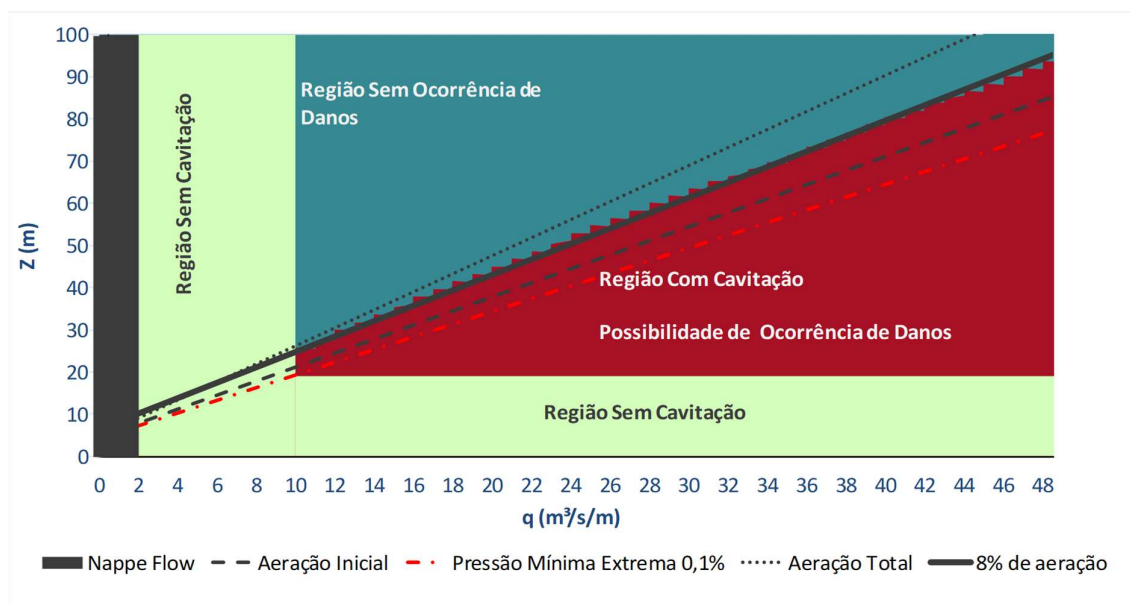
Figura 8 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 90$  cm,  $\theta = 53.13^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



Fonte: elaborada pela autora.



Figura 9 – Limites de cavitação e possibilidade de danos por cavitação para  $h_d = 120$  cm,  $\theta = 53.13^\circ$  e  $P_{0,1\%} = -10.09$  m.c.a.



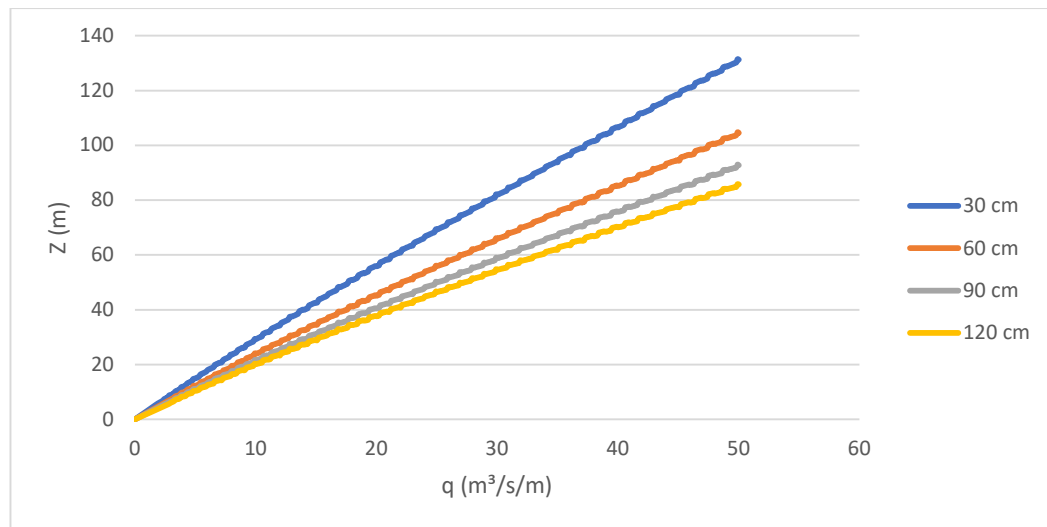
Fonte: elaborada pela autora.

Considerando as Figuras 2 a 9, foram obtidos os resultados apresentados a seguir.

Avaliando o início do escoamento deslizante sobre turbilhões, verifica-se que maiores degraus necessitam de vazões maiores para iniciá-lo. Além disso, em média, o escoamento deslizante sobre turbilhões, seguindo a metodologia proposta por Fael e Pinheiro (2003), ocorre a partir uma vazão específica de  $2,5 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$  para as condições de alturas e degraus e inclinações das calhas adotadas neste trabalho.

Considerando a curva de aeração visual inicial do escoamento (linha cinza tracejada) sobre as estruturas, foi verificado que quanto maior a altura do degrau, mais suave é a inclinação da curva (Figura 10). Isso ocorre devido a maior dissipação de energia obtida em maiores degraus, proporcionando maior aeração ao fluxo. Isso também foi concluído por Sanagiotto (2003). A Figura 10 foi apresentada para a inclinação da calha de  $53.13^\circ$ , mas foi observado o mesmo comportamento para a inclinação de  $45^\circ$ .

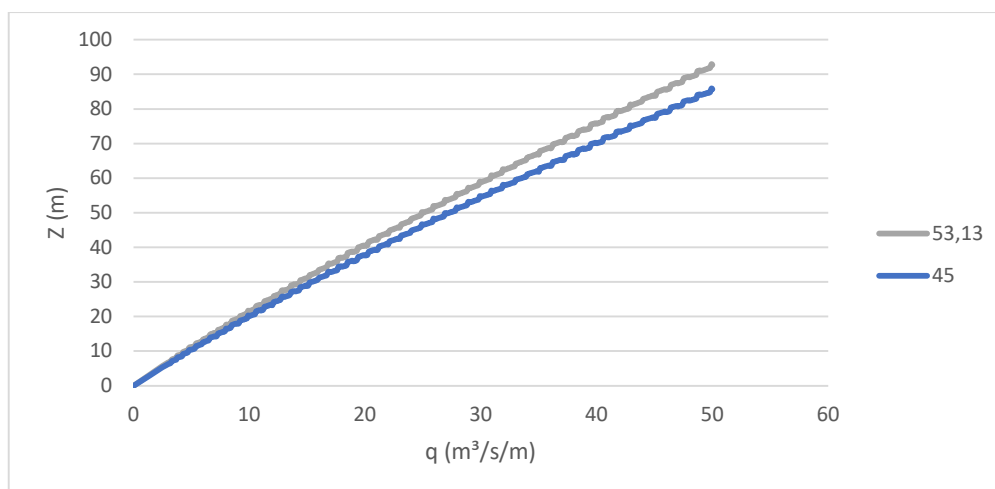
Figura 10 – Comparação entre curvas de início de aeração visual para diferentes alturas de degraus e mesma inclinação da calha ( $53,13^\circ$ ).



Fonte: elaborada pelos autores.

Percebe-se, também, que as curvas de aeração visual inicial são convergentes e muito próximas, quando comparados os resultados para as diferentes inclinações da calha escalonada. Com o aumento da vazão específica, quanto maior for a inclinação da calha, maior é a inclinação da curva de aeração. Isso ocorre devido a maior dissipação de energia obtida em declividades menores, proporcionando maior aeração ao fluxo, conforme Figura 11.

Figura 11 – Comparação entre curvas de aeração para diferentes inclinações de calha e mesma altura de degrau ( $h_d = 90$  cm).



Fonte: elaborada pelos autores.

As vazões que indicam o início do fenômeno de cavitação (aquelas em que a pressão mínima extrema chegou a -10,09 m.c.a.) para as diferentes características utilizadas, ocorreram entre 8,9 e 10,6 m³/s/m, com cargas hidráulicas entre 16 a 24 m. Estudos de Gomes (2006), Novakoski (2018) e Endres et al. (2019) apontam para incipiência de cavitação em torno de vazões específicas de 10 m³/s/m.

Também se verifica que a variação de inclinação e a altura dos degraus não alteram significativamente a vazão e localização da ocorrência do fenômeno de cavitação que devem propiciar o fenômeno de cavitação. Isso pode ser observado a partir das vazões e das alturas que levam à condição de incipiência à cavitação nas Figuras 12 e 13. O desvio padrão das vazões obtidas para incipiência a cavitação para as diferentes geometrias apresentadas está na ordem de 0,6 m³/s/m. Já a carga hidráulica apresenta um desvio padrão de 3,1 m de altura para que sejam atingidos os mesmos valores de pressão relacionada a cavitação. Ainda, a diferença apresentada entre a menor e a maior vazão capazes de iniciar o fenômeno de cavitação, é de 1,7 m³/s/m. Em relação à carga hidráulica, a diferença fica em 8m.

Considerando a declividade da calha, para que seja atingida a pressão de fenômeno de cavitação e a possibilidade de ocorrência de dano, com exceção de  $h_d=30$  cm, foram necessárias maiores alturas de barragem para a calha com maior declividade, conforme Figura 13. Apesar disso, ressalta-se que, ao transformar Z em

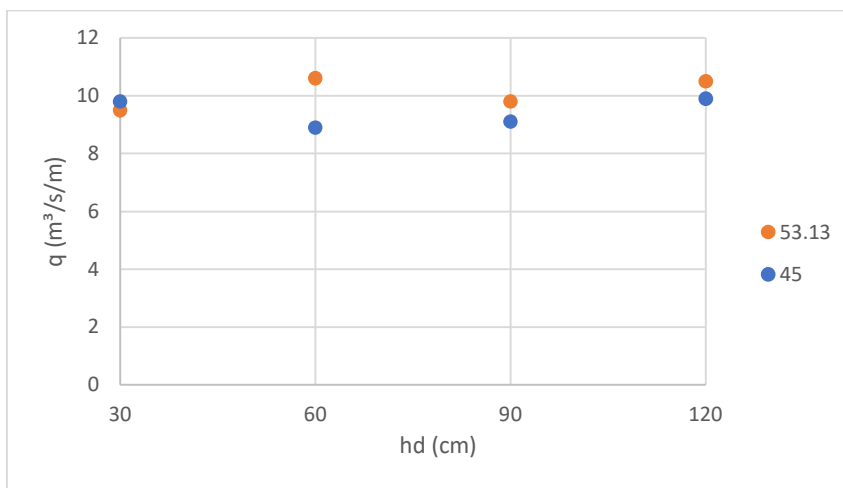
$Le^{*}_{0,1\%min}$  (utilizando a declividade da calha), serão necessárias calhas mais curtas para iniciar o fenômeno de cavitação.

Considerando, agora, a altura dos degraus, para que seja atingida a pressão do fenômeno de cavitação e a possibilidade de dano foram necessárias menores alturas de barragem para o degrau com maior altura, conforme Figura 12 e Figura 13. Isso pode ser atribuído ao fato de que maiores degraus apresentam maior rugosidade da calha e, com isso, há maior formação dos bolsões de ar no interior dos degraus e, conseqüentemente, as zonas de baixa pressão entre os degraus.

Já as vazões se mantiveram independentes no aparecimento da cavitação, quando observadas as alturas dos degraus e declividade da calha, principalmente para os degraus com alturas maiores.

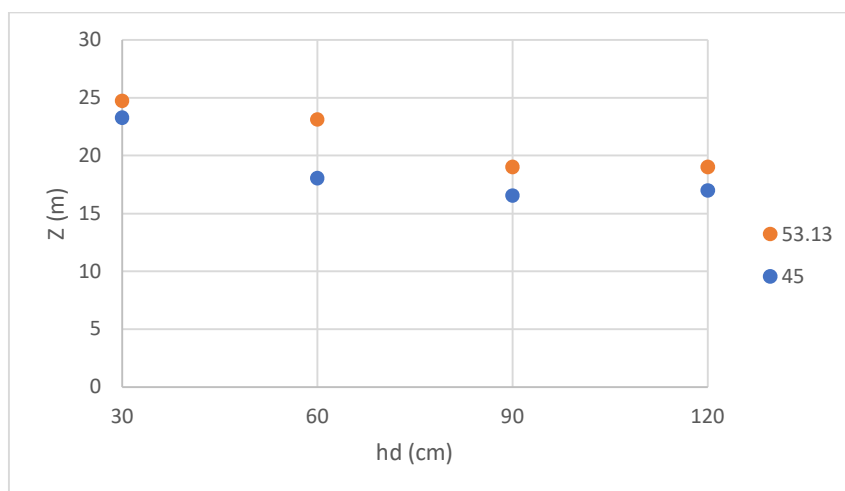
Também foi notada a maior dispersão dos resultados de início de cavitação para o degrau com 60 cm, quando comparado com as inclinações da calha. Esta dispersão ocorreu devido a fatores de escala do laboratório.

Figura 12 – Comparação entre vazões mínimas para início de cavitação, em função da altura dos degraus e declividade da calha.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 13 – Comparação entre alturas mínimas de barragens para início de cavitação, em função da altura dos degraus e declividade da calha.



Fonte: elaborada pela autora.

Ao se tratar da região de risco de danos por cavitação, percebe-se que ao atingir o valor mínimo de vazão para a ocorrência de cavitação, é observado que o fenômeno precisa de uma altura de barragem para que comece a ocorrer dentro da estrutura. Assim, para o limite de vazão também se estabelece um limite de altura de barragem para que o fenômeno possa se manifestar. Isso significa que nem toda vazão superior provocará cavitação na estrutura, se não possuir o comprimento de calha necessário.

Ressalta-se, ainda, que quanto maior a vazão escoada sobre os degraus do vertedouro, maior é a zona de ocorrência de pressões extremas mínimas.

Este intervalo de localização (comprimento da calha) da ocorrência do fenômeno e possibilidade de dano ao longo da calha escalonada tornam-se cada vez maiores à medida que a vazão e a altura da estrutura crescem. Esta informação é coerente com as observações feitas nos estudos de Canellas (2020), que afirma que a partir da primeira pressão mínima observada para determinada vazão, as outras intensidades de vazão passarão por esta pressão mínima na mesma posição e percorrerão mais alguns degraus até atingir o seu valor mínimo para então voltarem a crescer e se estabilizar.

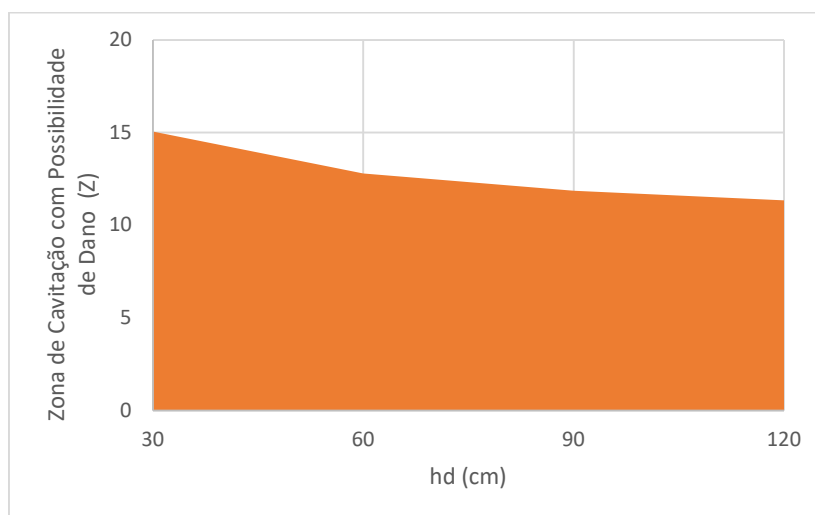
Pode-se observar que quanto maiores as alturas dos degraus da estrutura, mais antecedente é a vazão e a altura da barragem necessária para a ocorrência de dano; e que quanto maior a inclinação da calha, maior é a necessidade de altas

vazões e alturas para a ocorrência de dano. Além disso, a abrangência da região de possibilidade de dano por cavitação diminui conforme aumenta o tamanho dos degraus, mas aumenta junto com a declividade da calha. Assim como todos os estudos apontam que, quanto maior o degrau ou a declividade, maior a vazão necessária para a ocorrência do fenômeno de cavitação, quanto maior a altura do degrau e maior a declividade da calha, maior também é a distância necessária para que o fenômeno deixe de apresentar probabilidade de danos.

Apesar destas observações e dos esforços para diferenciar a estrutura geometricamente, a região de dano por cavitação teve uma oscilação de resultado insignificativa, obtendo diferenças menores do que 4 m de carga hidráulica total.

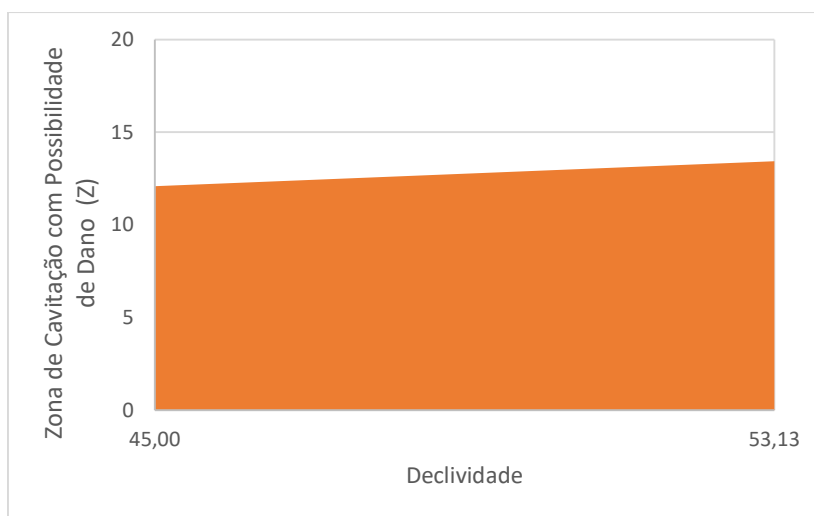
Nas Figura 14 e Figura 15 estes resultados podem ser visualizados, onde  $\Delta Z$  refere-se ao comprimento de abrangência da zona de cavitação, dado como zero o início do fenômeno de cavitação na estrutura.

Figura 14 – Abrangência da região de cavitação com probabilidade de dano ( $\Delta Z$ ) para diferentes alturas de degraus e  $q = 30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 15 - Abrangência da região de cavitação com probabilidade de dano ( $\Delta Z$ ) para diferentes declividades de calha e  $q = 30 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ .



Fonte: elaborada pela autora.

Vale ressaltar que a ocorrência da cavitação em uma estrutura, não significa intrinsecamente que ela sofrerá danos. Isto dependerá de outros fatores, como por exemplo, a resistência do concreto à tração, a concentração de ar no escoamento, dentre outros.

## CONCLUSÃO

De maneira geral, percebe-se que é possível identificar as regiões de cavitação e possibilidade de dano pelo fenômeno de cavitação em protótipos com diferentes alturas de degraus e inclinações.

Assim, percebe-se que maiores degraus produzem o fenômeno de cavitação em cargas hidráulicas menores, justificado pela formação de zonas instáveis nas rugosidades dos degraus; e que maiores inclinações produzem o fenômeno em maiores cargas hidráulicas, devido a capacidade de dissipação de energia e, conseqüentemente, entrada de ar no fluxo escoado. Ainda assim, a diferença apresentada entre a menor e a maior alturas capazes de iniciar o fenômeno de cavitação, é de 8 m.

Em relação às vazões, o surgimento da cavitação teve uma mínima variação entre as diferentes características propostas, sendo que a diferença apresentada

entre a menor e a maior vazão capazes de iniciar o fenômeno de cavitação foi de 1,7 m<sup>3</sup>/s/m.

Pode-se concluir, também, que um aumento de vazão produz faixas de cavitação e possibilidade de dano cada vez maiores ao longo da calha, mas que, para ocorrerem, necessitam de uma calha mais longa. A existência do fenômeno de cavitação não ocorre apenas devido a vazão, como sugere a bibliografia até então, mas também de uma extensão de vertedouro compatível com a vazão.

Também foi observado que, quanto maior a inclinação da calha escalonada e menores as alturas dos degraus, o fenômeno passível de dano demora a se estabilizar e, portanto, apresenta uma faixa mais extensa de possibilidade de dano. Apesar disso, a região de dano por cavitação teve uma oscilação de resultado insignificativa, obtendo diferenças menores do que 4 m de carga hidráulica total.

Ressalta-se, por fim, que a ocorrência ou não de dano por cavitação está sujeita a outras variações na estrutura, como por exemplo, a resistência do concreto aplicado.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecimentos especiais ao Laboratório de Obras Hidráulicas, onde foram realizadas as leituras, e toda a equipe que o compõe, desde bolsistas da graduação, a mestrandos, doutorandos e aos professores (principalmente meus orientadores Maurício Dai Prá e Marcelo Giulian Marques, essenciais para o desenvolvimento do trabalho). Agradecimentos à Furnas Centrais Elétricas pelo investimento nas pesquisas da UFRGS e, principalmente, neste projeto.

## **REFERÊNCIAS**

BALL, J. W. Cavitation from Surface Irregularities in High Velocity. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 102, No. HY9, pp. 1283-1297, 1976.

CANELLAS, A.V.B. Pressões extremas atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

CONTERATO, E. Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.



DAI PRÁ, M. Características do escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. 2004. 134 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2004.

ENDRES, L.A.M.; SCHUMACHER, A.; CANELLAS, A.V.B.; DA SILVA, F.A. Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus. XXXII Seminário Nacional de Grande Barragens. Salvador, BA, Brasil. 2019.

FAEL, C.; PINHEIRO, A. N. Escoamentos em Quedas Sucessivas. Condições de Ocorrência e Energia Residual. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos, v. 24, n.1, p. 39-50. 2003.

GALPERIN, R.; et al. Hydraulic structures operation under cavitation conditions. International Association for Hydraulic Research, 1971.

GOMES, J. Campo de Pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

MATOS, J. S. G. Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Tese de Doutorado. Instituto Técnico Superior. Lisboa, Portugal. 1999.

NOVAKOSKI, C. K.; et al. Extreme negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways. III International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brasil, 2018.

OSMAR, F. M. Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

PRIEBE, P.S. Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

SANAGIOTTO, D.G. Características do escoamento sobre vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCHUMACHER, A. Determinação dos comprimentos característicos do escoamento deslizante sobre turbilhões baseados em pressões extremas mínimas em um vertedouro em degraus. Em fase de elaboração.

VIEIRA JR., L. P.; GONTIJO, M. C. Deterioração, proteção e reabilitação de barragens de concreto. Revista Concreto e Construções – IBRACON, 2011, São Paulo, SP.

## 7 CONCLUSÃO

Com os estudos realizados, conclui-se que:

- a) a partir dos dados obtidos em laboratório, foi possível desenvolver equações que caracterizam o comprimento de aeração natural inicial, o comprimento até o ponto de pressão extrema mínima e o comprimento de aeração natural total ou ponto onde as pressões mínimas extremas oscilam em torno de um valor constante;
- b) o ponto de menor pressão mínima extrema ocorre em um comprimento 0,8 vezes antes do comprimento de aeração visual inicial natural, confirmando o apresentado por Gomes (2006) e Osmar (2016) de que o ponto de menor pressão mínima extrema ocorre ligeiramente a montante do ponto de aeração visual inicial;
- c) o comprimento de aeração total é cerca de 1,5 vezes maior do que o comprimento da aeração visual inicial;
- d) é possível reunir em um gráfico as regiões sem cavitação, regiões com cavitação com risco de danos e regiões com cavitação sem ocorrência de danos por cavitação, em situações de protótipo, considerando diferentes alturas de degraus e inclinações da calha;
- e) pressões mínimas extremas com 0,1% de probabilidade de não excedência apresentam vazões específicas incipientes à cavitação entre 8,9 e 10,6 m<sup>3</sup>/s/m, em cargas hidráulicas entre 16 e 24 m para chegar ao fenômeno de cavitação;
- f) quanto maior a vazão escoada, maior é a zona de abrangência do fenômeno de cavitação com possibilidade de danos;
- g) ao incorporar a teoria de Matos (1999) de que a possibilidade de danos é reduzida e praticamente inexistente quando o fundo do canal apresenta 8% de aeração, o estudo apresentou maior detalhamento para definir o risco de dano por cavitação nas estruturas;
- h) a estabilização das pressões foi obtida após ser identificada a aeração total do escoamento;
- i) maiores degraus ocasionaram o fenômeno de cavitação em menores cargas hidráulicas. Isso é justificado devido à rugosidade da calha, em que há o surgimento dos bolsões de ar no vértice interno do degrau e,

conseqüentemente, zonas de baixa pressão entre os espaços de um degrau e outro;

- j) maiores inclinações ocasionam o fenômeno de cavitação em maiores cargas hidráulicas, isso é justificado devido à maior instabilidade no fluxo produzida em inclinações maiores, que facilitam a entrada de ar no interior dos degraus;
- k) as vazões incipientes ao fenômeno de cavitação se mantiveram independentes, quando observados o aumento das alturas dos degraus e declividade da calha;
- l) a existência do fenômeno de cavitação necessita da combinação de vazão e extensão suficiente para se desenvolver no decorrer da calha;
- m) a extensão da região de possibilidade de dano por cavitação aumenta com o aumento da declividade da calha, mas diminui com o acréscimo de altura dos degraus.
- n) apesar dos esforços para diferenciar a estrutura geometricamente, a região de dano por cavitação teve uma oscilação de resultado insignificativa, obtendo diferenças menores do que 4 m de carga hidráulica total.

Apesar de todas estas observações, é importante notar que a ocorrência do fenômeno de cavitação e de danos por cavitação está sujeita a outras diversas condições, como à resistência do material da superfície hidráulica, elementos estruturais, como juntas de dilatação e rugosidade do material.

## 8 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Considerando os resultados obtidos e as dificuldades encontradas no desenvolvimento desta dissertação, sugere-se para trabalhos futuros:

- a) realizar estudos referentes à indução forçada de ar no escoamento e o quanto isso interfere nas pressões com 0,1% de probabilidade de não excedência, visto que neste estudo foram observadas apenas as pressões obtidas no escoamento com aeração natural;
- b) integrar aos estudos propostos, as condições de resistência do concreto da calha escalonada, proporcionando assim uma escala de necessidade de reforço da superfície, em MPa;
- c) integrar os dados de pressão, com aeração induzida e resistência de concreto;
- d) desenvolver um software/programação que altere os gráficos conforme a necessidade do projetista; e
- e) obter o mesmo estudo para calhas lisas, salientando juntas estruturais e rugosidade do material.

## REFERÊNCIAS

ABREU, A. S. Processo de Cavitação em Estruturas Hidráulicas: Escoamento a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertido. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2014.

AMADOR, A. Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados em presas de hormigón compactado. Tese de doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC), Barcelona, 2005.

ANDRIOLLO, F.R. The use of roller compacted concrete. São Paulo: Oficina de Textos, 554p. 1998.

BALL, J. W. Cavitation from Surface Irregularities in High Velocity. Proceedings of the American Society of Civil Engineers, vol. 102, No. HY9, pp. 1283-1297, 1976.

BAPTISTA, M.; LARA, M.; Fundamentos da Engenharia Hidráulica. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. Edição revisada e ampliada.

BRASIL. Lei 12334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

CANELLAS, A.V.B. Pressões extremas atuantes nas proximidades das quinas dos degraus de vertedouros. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.

CBDB - Large Brazilian Spillways an Overview of Brazilian Practice and Experience in Designing and Building Spillways for Large Dams, 2002.

CHANSON, H. Hydraulic design of stepped cascades, channels, weirs and spillways. Pergamon, Oxford, UK. 1994c.

CHANSON, H. Hydraulics of Nappe Flow Regime above Stepped Chutes and Spillways. Aust. Civil Engrg Trans., I.E.Aust., Vol. CE36, No. 1, Jan., pp. 69-76 (ISSN 0819-0259). 1994a.

CHANSON, H. Hydraulics of skimming flows over stepped channels and spillways. Journal of Hydraulic Research, IAHR. 1994b.

CHANSON, H. Prediction of the transition nappe/skimming flow on a stepped channel. Journal of Hydraulic Research, vol. 34. 1996.

CHANSON, H. The hydraulics of stepped chutes and spillways. The Netherlands: A. A. Balkema Publishers, 2002.

CONTERATO, E. Determinação de critérios de dimensionamento de soleira terminal em bacia de dissipação a jusante de vertedouro em degraus. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 2014.

CONTERATO, E. Escoamento sobre Vertedouro em Degraus com Declividade 1V:0,75H: Caracterização das Pressões e condições de aeração. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

COUTINHO, M. J. A. R. S. Melhoria da Durabilidade dos Betões por Tratamento da Cofragem. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 1ª edição. 2005.

DAI PRÁ, M. Características do Escoamento Sobre Vertedouros em Degraus de Declividade 1V:1H. 2004. 134 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre, 2004.

DANESHFARAZ, R.; JOUDI, A.R.; GHARAMANZADEH, A.; GHADERI, A. Investigation of flow pressure distribution over a stepped spillway. Advances and Applications in Fluid Mechanics. Pushpa Publishing House, Allahabad, India, 2016.

DUNSTAN, M.R.H. The state of art of dams in 2003 – An Update of ICOLD Bulletin No 125. Fourth International Symposium on Roller Compacted Concrete (RCC) Dams, Madrid, Spain. 2003.

ENDRES, L.A.M.; SCHUMACHER, A.; CANELLAS, A.V.B.; DA SILVA, F.A. Delimitação de vazões em função de pressões extremas sobre uma calha de vertedouro em degraus. XXXII Seminário Nacional de Grande Barragens. Salvador, BA, Brasil. 2019.

FAEL, C.; PINHEIRO, A.N. Escoamentos em quedas sucessivas: condições de ocorrência e energia residual. Associação Portuguesa de Recursos Hídricos. V 24. 2003.

FALVEY, H. Cavitation in chutes and spillways. A Water Resources Technical Publication. Bureau of Reclamation, Denver Office, Colorado, EUA, 1990.

FALVEY, H. T. Predicting Cavitation in Tunnel Spillways. Waterpower and Dam Construction, Vol. 34, 1982.

GAL'PERIN, R.S. Flow Energy Dissipation in the lower pool of spillways. UDC 626-33:627.8:532.59, 1977.

GALPERIN, R.; et al. Hydraulic structures operation under cavitation conditions. Internacional Association for Hydraulic Research, 1971.

GOMES, J. Campo de Pressões: Condições de incipiência à cavitação em vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

GONZALEZ, C.A.; CHANSON, H. Air Entrainment and energy dissipation on embankment spillways. International Symposium on Hydraulic Structures. IAHR. Ciudad Guayana, Venezuela. 2006.

HEYMAN, F. J. On the time dependence of the rate of erosion due to impingement or cavitation. Publicação técnica especial. N. 408. American Society for Testing and Materials, 1967.

KEMPKA, M.; Determinação das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida: Aplicação em Eclusas de Navegação. 2011. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso- Departamento de Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS. 2011.

KEMPKA, M.; Estimativa da Distribuição Longitudinal das Pressões a Jusante de Comportas Tipo Segmento Invertida. 2014. 120f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS. 2014.

KORMANN, A. C. Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

KORMANN, A. C. et al. Processos erosivos em superfícies de concreto de barragens – Mecanismo e recuperação. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza - CE. 11p., 2001.

LEITE, A. R. C. A. de P.; et al. Erosões causadas por cavitação na região dos dentes dissipadores de energia no vertedouro de superfície da UHE Ilha Solteira. Anais da 32ª REIBRAC – IBRACON, Fortaleza, 1990.

LEWIS, S. The World's Largest Roller-Compacted Concrete Dams. Engineering News Record (ENR). 2015.

LOPARDO, R. A. Cavitación em fluxos macroturbulentos, *Matematicae Notae*, UNR Editora, Rosário, Argentina, Ano XLII, v.2, p.19-40, 2003.

LOPARDO, R. A.; HENNING, R. E. Efectos de las condiciones de ingreso al resalto sobre el campo de presiones instantáneas. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE HIDRÁULICA, 12., 1986, São Paulo, Brasil. Anais ... São Paulo: IAHR, 1986. v.1 p. 116-127.

LOPARDO, R. A.; LIO, J. C. D.; VERNET, G. F. Physical modelling on cavitation tendency for macroturbulence of hydraulic jump. International Conference on the hydraulic modelling of civil engineering structures, 1982.

LOPES, G. L. A.; A Cavitação nas Turbinas Hidráulicas. 1944. 100f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) - Universidade do Porto, Porto - Portugal. 1944.

MATOS, J.S.G., QUINTELA, A.C. Descarregadores de cheias em degraus: posição actual da avaliação da dissipação de energia. Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 11., ABRH. Recife – Brasil. 1995.

MATOS, J. S. G. Emulsão de ar e dissipação de energia do escoamento em descarregadores em degraus. Dissertação de doutoramento. Instituto Técnico Superior, Portugal. 1999.

MAY, R. W. P. Cavitation in Hydraulic Structures: occurrence and prevention. Hydraulics Research. Report n. 79, Wallingford, Oxfordshire, 1987.

NOVAK, P.; et al. Hydraulic Structures. 4ª edição Oxon: Tayloy & Francisc, 2007.

NOVAKOSKI, C. K.; et al. Extreme negative pressures and cavitation tendency on steeply sloping stepped spillways. III International Dam World Conference, Foz do Iguaçu, Brasil, 2018.

OHTSU, I.; YASUDA, Y.; TAKAHASHI, M. Onset of skimming flow on stepped spillways – discussion. Journal of Hydraulic Engineering. ASCE. New York. 2001.

OSMAR, F. M. Análise de esforços sobre vertedouros em degraus de declividade 1V:0,75H, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2016.

PEGRAM, G.; OFFICER, A.; MOTTRAM, S. Hydraulics of skimming flow on modeled stepped spillways, J. Hydr. Eng., ASCE, 125(4), 361-368, 1999.

PETERKA, A. J., The Effect of Entrained Air on Cavitation Pitting. Proceedings of the Joint Meeting of the International Association for Hydraulic Research and the American Society of Civil Engineers, Minneapolis, MN, 1953.

PINFARI, J. C.; et al. Reparos no concreto e construção do dispositivos anti-vórtice no vertedouro da UHE Ilha Solteira. Anais do 45º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, Vitória, 2003.

PLESSET, M. S. The pulsation method for generating cavitation damage. Journal of Basic Engineering, ASME, Vol. 85, 1963.

PORTUGAL. Ministério da Habitação de Obras Públicas – Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Critérios para dimensionamento hidráulico de barragens descarregadoras. Lisboa, 1981.

PRESTES, A.C. et al. Influência da utilização de diferentes comprimentos de condutos flexíveis em medições de pressão na calha de um vertedouro em degraus. XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (ABRH). Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil. 2019.

PRIEBE, P.S. Influência da aeração induzida por pilares no escoamento sobre vertedouros em degraus. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. 2020.



- QUINTELA, A. C., RAMOS, C. M.; Protecção Contra a Erosão de Cavitação em Obras Hidráulicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Ministério de Habilitação e Obras Públicas. Lisboa, 1980.
- SALLES, F. M. Algumas considerações sobre a erosão por cavitação no concreto de estruturas sujeitas a ação d'água em alta velocidade. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens, Rio de Janeiro, 1980.
- SALLES, F. M. Algumas ocorrências de patologias em estruturas de concreto das barragens e os tratamentos adotados pela CESP. XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens, Fortaleza, 2001.
- SANAGIOTTO, D.G. Características do escoamento sobre vertedouros em degraus com declividade 1V:0,75H. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- SÁNCHEZ-JUNY, M. Comportamiento hidráulico de los aliviaderos escalonados en presas de hormigón compactado: Análisis del campo de presiones. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya, 2001.
- SIMÕES, A.L.A. Escoamentos turbulentos em canais e vertedores com o fundo em degraus: resultados experimentais, soluções numéricas e proposições teóricas. Relatório de Pesquisa (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2012.
- TATRO, S.B.; et al. Compedium of Case Histories on Repair of Erosion-Damaged Concrete in Hydraulic Structures, ACI 210.1 R-94, 1999.
- THIRUVENGADAM, A. A comparative Evaluation of Cavitation Damage Devices. Symposium on cavitation Research facilities and techniques, ASME, 1964.
- TOMITA, Y. AND SHIMA, A. Mechanisms of Impulsive Pressure Generation and Damage Pit Formation by Bubble Collapse. Journal of Fluid Mechanics, 169, 535-564, 1986.
- TOZZI, M. J.; Caracterização/Comportamento de escoamentos em vertedouros com paramento em degraus. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.
- TULLIS, J. P. Intercâmbio Internacional sobre transients hidráulicos e cavitação: cavitação em sistemas hidráulicos. São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica, 1982.
- TURELLA, D. S. Critérios de Dimensionamento para Bacia de Dissipação por Ressalto Hidráulico Tipo I. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, 2010.

VIEIRA JR., L. P.; GONTIJO, M. C. Deterioração, proteção e reabilitação de barragens de concreto. Revista Concreto e Construções – IBRACON, 2011, São Paulo, SP.

VOLKART, P.; RUTSCHMANN, P. Air Entrainment Devices (Air Slots). Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Nr 72. Zurich, 1984.

ZUCH, R.A. Manifestações Patológicas nas estruturas em concreto de usinas hidrelétricas: levantamento de ocorrências e estratégias de reparo utilizadas. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.