

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
COMISSÃO DE GRADUAÇÃO DO CURSO ENGENHARIA CIVIL**

GIANLUCA ARNOLD BORGES

**CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO EM
UM VERTEDOIRO DE CALHA LISA**

Porto Alegre
Fevereiro de 2024

GIANLUCA ARNOLD BORGES

**CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO EM
UM VERTEDOIRO DE CALHA LISA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado a Comissão de Graduação do curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Mauricio Dai Prá

Porto Alegre 2024

GIANLUCA BORGES

**CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESCOAMENTO EM
UM VERTEDOURO DE CALHA LISA**

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

Porto Alegre, 15 de fevereiro de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Mauricio Dai Prá (UFRGS)

Dr. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Orientador

Prof. Carolina Kuhn Novakoski (UFSM)

Dra. pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Aline Saupe Abreu (UFRGS)

MSc. pela Universidade Federal de Pelotas

Este trabalho é dedicado a todos familiares e amigos que contribuíram e incentivaram para que eu estivesse aqui hoje. Vocês me tornaram a pessoa que eu sou e sou muito grato a isso. Obrigado.

AGRADECIMENTOS

Concluir este trabalho dignifica a concretização de uma jornada de esforço, amadurecimento e crescimento pessoal.

Agradeço a Deus por ter sido a pedra angular nesta jornada, força motriz sem a qual nenhum passo seria possível.

À minha mãe, Rejaine, sinônimo de esforço, coragem e dedicação: obrigado por ser minha melhor amiga e incentivadora nas horas difíceis e ter as melhores palavras de afeto e carinho quando preciso.

Ao meu pai, Giancarlo: obrigado pelo amor incondicional e apoio. Tua forma de demonstrar teu apoio me motiva a ser sempre melhor naquilo que busco ser, tal qual adulto e profissional que sigo me tornando.

Aos meus amigos Graziella, Antonio, Daniel, Débora, Giovanna, Maria Luiza, Matheus, Natália, Ricardo e Tatiana: obrigado por tornarem a vida melhor e serem a minha família fora de casa. Se me sinto feliz e em casa, é por causa de vocês.

Ao Ricardo, que sempre esteve me apoiando e mostrando que a vida pode ser mais leve e empática, o companheirismo e crescimento que tivemos foi imprescindível para isso.

Ao meu orientador Maurício Dai Prá, que foi um grande motivador e me inspirou a escolher o assunto deste trabalho. Obrigado pela paciência e por ter se prontificado a revisar este tema tão interessante e desafiador comigo.

Obrigado à equipe da Furnas Centrais Elétricas S.A., Foz do Chapecó Energia S.A. e LOH – UFRGS pela disponibilização dos dados e apoio à pesquisa.

Aos meus colegas de faculdade, e aos agora grandes engenheiros, Eduarda, Felipe, Julia e Laura: serei eternamente grato pelos momentos em que compartilhamos juntos, nas dificuldades e perseveranças. Certamente, as coisas foram mais leves graças a vocês.

Aos meus chefes, principalmente ao Matheus, pelas oportunidades valiosas de aprendizado e evolução, pessoal e profissional, e por mostrarem a realidade da engenharia no dia a dia.

“O mais difícil é a decisão de agir, o resto é apenas tenacidade.” (Amelia Earhart)

RESUMO

Barragens são estruturas que funcionam como uma barreira artificial para reter o fluxo d'água a fim de produzir energia elétrica, abastecimento, irrigação ou retenção de sólidos. Todavia, toda estrutura é passível de gerar riscos devido a má execução ou conservação inadequada, o que torna essencial realizar estudos prévios com foco em aumentar a segurança e evitar um possível situações de rompimento ou deterioração da construção. A prevenção de potenciais danos às superfícies hidráulicas, vital para a segurança de reservatórios e barragens, é uma das principais preocupações pois, quando não planejadas, resultam em prejuízos financeiros e custos excessivos de manutenção para os operadores do sistema. O estudo de parâmetros hidráulicos para vertedouros de barragens assume um papel fundamental na mitigação de danos e riscos, devido a possíveis variações significativas de pressão e velocidade ao longo do fluxo vertente. Este estudo visa identificar o potencial de danos, principalmente causados por cavitação, nos vertedouros de calha lisa, através de dados obtidos da Usina Hidrelétrica de Furnas utilizando o software SpillwayPro desenvolvido pelo US Bureau of Reclamation (USBR), em conjunto da análise das características geométricas da superfície vertente para diferentes vazões vertidas. Foram analisados parâmetros hidráulicos como pressões médias, velocidades médias e índices de cavitação ao longo das superfícies de concreto. Os resultados foram comparados com dados de um modelo na escala reduzida de 1:45, obtidos pelas Eletrobras-FURNAS, em conjunto de limites estabelecidos na literatura para identificar a ocorrência dos danos no vertedouro examinado. Com isso, foram encontrados dados coerentes para os parâmetros, condicionados as limitações das duas abordagens, que poderão servir na determinação de zonas críticas à estrutura, mas que não devem ser considerados como uma abordagem totalmente precisa, sendo recomendável recorrer a outros métodos caso seja necessário atingir tal objetivo.

Palavras-chave: vertedouro de calha lisa; pressão média; velocidade média; índice de cavitação; simulação unidimensional; SpillwayPro; potencial de dano; barragem.

ABSTRACT

Dams are structures that function as an artificial barrier to retain the flow of water in order to produce electricity, supply, irrigation or retain solids. However, every structure is likely to generate risks due to poor execution or inadequate conservation, which makes it essential to carry out prior studies focused on increasing safety and avoiding possible situations of rupture or deterioration of the construction. The prevention of potential damage to hydraulic surfaces, vital for the safety of reservoirs and dams, is one of the main concerns because, when unplanned, they result in financial losses and excessive maintenance costs for system operators. The study of hydraulic parameters for dam spillways plays a fundamental role in mitigating damage and risks, due to possible significant variations in pressure and velocity along the stream flow. This study aims to identify the potential for damage, mainly caused by cavitation, in smooth channel spillways, through data obtained from the Furnas Hydroelectric Plant using the SpillwayPro software developed by the US Bureau of Reclamation (USBR), together with the analysis of geometric characteristics of the slope surface for different flow rates. Hydraulic parameters such as average pressures, average speeds and cavitation rates along the concrete surfaces were analyzed. The results were compared with data from a model on a reduced scale of 1:45, obtained by Eletrobras-FURNAS, using a set of limits established in the literature to identify the occurrence of damage in the examined spillway. As a result, coherent data were found for the parameters, subject to the limitations of the two approaches, which could be used to determine critical areas for the structure, but which should not be considered a completely accurate approach, and it is recommended to resort to other methods if necessary achieve that objective.

Keywords: smooth channel spillway; medium pressure; average speed; cavitation index; one-dimensional simulation; SpillwayPro; damage potential; dam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de vertedor.	19
Figura 2 - Vertedor de parede espessa (esquerda), inclinado (esquerda) e com diferentes contrações (direita)	19
Figura 3 - Vertedor de parede fina (esquerda) e vertedor-extravasador de soleira normal (direita)	21
Figura 4 - Perfil proposto por Creager	22
Figura 5 - Perfil proposto pelo USBR	24
Figura 6 - Parâmetros k e N da Equação 3 do perfil apresentado pelo USBR (1966)..	24
Figura 7 – Perfil proposto pela WES	25
Figura 8 - Zona de pressão subatmosférica em um perfil USBR com comportas	28
Figura 9 - Distribuição de pressões ao longo de um vertedor.	29
Figura 10 - Variação da distribuição de pressões no trecho reto com declividade.....	30
Figura 11 - Colapso próximo a superfície da estrutura.....	33
Figura 12 - Colapso dentro de um fluido estático.....	33
Figura 13 - Extravasador da barragem de Oroville, Califórnia	40
Figura 14 - Danos gerados por cavitação no extrasor da barragem de Oroville.....	40
Figura 15 - Quadro resumo da UHE FURNAS	42
Figura 16 - Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Furnas, Minas Gerais	42
Figura 17 – Aba Input Geometry - SpillwayPro.....	46
Figura 18 – Aba Output Geometry – SpillwayPro - Vazão de 1150 m ³ /s	50
Figura 19 - Lâmina d'água conforme dados obtido no software SpillwayPro.....	52
Figura 20 - Lâmina d'água conforme dados obtidos nos dados enviados pela Eletrobras-FURNAS.....	52
Figura 21 - Comparação das alturas de água ao longo da estrutura	53
Figura 22 – Pressões conforme dados obtidos no software SpillwayPro	54
Figura 23 - Pressões conforme dados obtidos nos dados enviados pela Eletrobras-FURNAS	55
Figura 24 - Comparação entre as pressões médias para duas vazões ao longo da estrutura	56
Figura 25 - Comparação entre as pressões médias para vazão de Q=8500m ³ /s ao longo da estrutura	56

Figura 26 – Velocidades conforme dados obtidos no software SpillwayPro	58
Figura 27 - Velocidades calculada conforme dados obtidos pela Eletrobras-FURNAS	58
Figura 28 - Comparação entre as velocidades médias para duas vazões ao longo da estrutura	60
Figura 29 - Índice de Cavitação conforme dados obtidos no SpillwayPro.....	62
Figura 30 - Índice de Cavitação conforme dados no modelo	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Inclinação do parâmetro a montante.....	25
Tabela 2 - Critérios a serem considerados no projeto na prevenção de danos por cavitação.	36
Tabela 3 - Limites apresentados por Falvey (1990) para velocidades.....	37
Tabela 4 - Limites apresentados por Ball (1959) para velocidades.....	37
Tabela 5 - Características do modelo do sistema extravasor da UHE Furnas	44

LISTA DE SIGLAS

UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	Usina Hidrelétrica
WES	Waterways Experiment Station
USBR	United State Bureau of Reclamation
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
P&D	Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento
LAHE	Laboratório de Concreto e Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos
NA	Nível d'água

LISTA DE SÍMBOLOS

Q_d e Q	vazão
h_d e H_d	carga de projeto
x	coordenada cartesiana
y	coordenada cartesiana
L	comprimento
K e n	parâmetros
H_e	carga total sobre a crista
P	pressão
γ	peso específico
h	profundidade
y'	distância vertical da superfície até o fundo
θ	ângulo relativo a inclinação
P'	pressão corrigida
v	velocidade do escoamento
R e R_b	raio de curvatura
C_0	coeficiente de vazão
L_{ef}	comprimento efetivo
h	carga de operação
K_p	coeficiente de contração do pilar
K_a	coeficiente de contração na aproximação
h_a	carga de velocidade
H_0	soma das cargas de projeto e carga de velocidade
g	aceleração da gravidade
a	abertura efetiva da comporta
P_0	pressão de referência
V_0	velocidade de referência
Z	elevação
Z_0	elevação de referência
ρ	densidade do escoamento
C_p	coeficiente de pressão ou número de Euler
E_f	energia potencial do escoamento
E_0	energia potencial de referência

P_v	pressão de vapor da água
σ	índice de cavitação
σ_{cr}	índice de cavitação crítico
Θ_d	ângulo de deflexão da curva
S_b	distância da coordenada da curva invertida
A	área molhada
e	espessura
P_{atm}	pressão atmosférica
S_0	declividade entre duas seções
E_s	elevação na seção
S_s	estação na seção

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVOS GERAIS	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. BARRAGENS E VERTEDOUROS.....	17
3.2. ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS DE CALHA LISA	20
3.2.1. Perfil de um vertedor-extravasador de soleira normal	20
3.2.2. Perfil Creager	21
3.2.3. Perfis do tipo USBR e WES	23
3.2.4. Perfil Scimemi.....	26
3.3. PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE ESTUDO	26
3.3.1. Pressão	26
3.3.2. Coeficiente de Descarga e Vazão.....	31
3.3.3. Cavitação.....	32
3.3.4. Velocidade Média	36
3.4. DANOS EM SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS DE CONCRETO	37
4. METODOLOGIA.....	41
4.1. CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA HIDRÁULICA	41
4.2. SOBRE O MODELO.....	43
4.3. SOBRE O SOFTWARE SPILLWAYPRO	45
4.3.1. DADOS DE ENTRADA	46
4.3.2. DADOS DE SAÍDA	49
5. ANÁLISES DOS RESULTADOS	51
5.1. LÂMINA D'ÁGUA MÉDIA	51
5.2. PRESSÃO MÉDIA	54
5.3. VELOCIDADE MÉDIA.....	57
5.4. ÍNDICE DE CAVITAÇÃO	61
6. CONCLUSÕES.....	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1. INTRODUÇÃO

Ao analisar estruturas tão complexas como as barragens de grande, médio ou pequeno porte, temos que observar separadamente cada segmento que as compõe devido suas características de construção e funcionamento. Os principais segmentos incluem: o vertedouro, o descarregador de fundo, a tomada d'água e o dissipador de energia, sendo estas as estruturas responsáveis por conduzir a água às condições naturais do curso d'água sem ocasionar danos ao leito de origem.

A começar pelo vertedouro, este tem como finalidade extravasar o excesso d'água quando o nível d'água (NA) do corpo hídrico alcança o topo da estrutura. A partir disso, o excedente liberado escoar com segurança pela calha de forma que evite causar problemas à estrutura e à margem do rio, além de prevenir danos por erosão.

O descarregador de fundo é uma estrutura que pode estar presente em barragens. Construída na parte baixa do corpo da barragem, possui um sistema de tubos (ou canais) que libera água do fundo do reservatório, assim como também serve para remoção gradual de sedimentos acumulados no fundo, aproveitando a capacidade de arraste do fluxo de água. O assoreamento, que é o acúmulo de sedimentos devido a atividades humanas e processos naturais nas bacias hidrográficas, é um fenômeno constante e intrínseco aos diversos projetos de armazenamento de água, o que justifica a necessidade dessa estrutura (ABREU, 2019).

Semelhante construtivamente ao descarregador de fundo são as tomadas d'água. Essa estrutura tem como função servir de sistema de entrada de um escoamento livre para um conduto forçado, controlando o fluxo em um tubo fechado, para fornecer água, por exemplo, para turbinas hidráulicas na geração de energia elétrica, propiciando de baixas velocidades para limitar os esforços e as perdas de carga. Diferente do descarregador de fundo, há a necessidade de haver um gradil para impedir a entrada de corpos flutuantes que possam danificar os equipamentos eletromecânicos.

Outra estrutura que merece destaque é o dissipador de energia, dispositivo de redução da velocidade de escoamento que compõe o sistema extravasor. Tal qual as outras estruturas, nem sempre há a necessidade de haver esses dispositivos em uma barragem, pois depende do projeto, condições locais e propósito. Sua principal função é de minimizar a erosão e o desgaste da região de descarga d'água, de forma a proteger o solo e as regiões adjacentes e evitar o acúmulo de sedimentos no canal de restituição. Além disso, esse tipo de estrutura oferece ao projetista a capacidade de modificar um escoamento supercrítico para subcrítico,

alcançando esse efeito por meio da indução de um ressalto hidráulico, no caso das bacias de dissipação (CETESB, 1986).

Por mais que as estruturas mencionadas desempenhem um papel fundamental na segurança dos projetos de aproveitamento hídrico, em alguns casos, elas podem estar sujeitas a desenvolver problemas estruturais. Mesmo quando são adequadamente dimensionadas, tanto o vertedouro quanto o dissipador de energia podem estar sujeitos a esforços hidrodinâmicos extremamente intensos e variáveis durante sua operação normal. Portanto, é de suma importância prever os esforços que ambas as estruturas precisarão suportar e, assim, buscar a solução mais segura e econômica possível.

Com base nesse contexto, esse estudo busca examinar, seja através de modelos físicos ou simulações computacionais, as áreas impactadas ao longo da calha de um vertedouro de uma barragem devido a problemas ligados a fenômenos de cavitação ao longo do tempo. Serão avaliados parâmetros como pressão, velocidade e índice de cavitação para melhor caracterizar o comportamento hidráulico da estrutura e reforçar a importância da análise de características de um escoamento vertente sobre um vertedouro.

2. OBJETIVOS

Os objetivos deste estudo estão divididos em objetivos gerais e objetivos específicos, os quais foram organizados de acordo com sua relevância e prioridade no trabalho.

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo principal do trabalho é caracterizar o escoamento em um vertedouro de calha lisa, analisando parâmetros que podem gerar danos ao concreto e realizar uma comparação de dados obtidos em modelo físico e a partir de simulação via software SpillwayPro.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos secundários são os seguintes:

- Caracterizar o escoamento sobre o vertedouro de calha lisa da Usina Hidrelétrica de Furnas, visando analisar parâmetros como pressão média, velocidade média e índice de cavitação;

- Analisar dados obtidos da modelagem física com os resultados das simulações via SpillwayPro, a partir de seis vazões compreendidas entre a mínima, a máxima vertida e a vazão de projeto;
- Comparar as abordagens, na busca de verificar se ambas apresentam dados consistentes e significativos;
- Identificar e determinar as áreas com maior potencial de ocorrência de cavitação, bem como avaliar a influência e intensidade dos parâmetros analisados nas diferentes regiões da estrutura do vertedouro da barragem.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste segmento estão os principais fundamentos teóricos consultados e empregados na condução deste trabalho. São destacados conceitos sobre barragens, salientando a UHE FURNAS, vertedouros, parâmetros hidrodinâmicos e danos a superfícies hidráulicas.

3.1. BARRAGENS E VERTEDOUROS

Primeiramente, cabe definir, não apenas os componentes estruturais de uma barragem, mas também fornecer uma visão abrangente sobre seus tipos e o contexto abrangente que as envolve, incluindo sua definição geral. Conforme a Resolução nº 143 (2012, p.16) do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), considera-se barragem “qualquer estrutura em um curso permanente ou temporário de água para fins de contenção ou acumulação de substâncias líquidas ou de misturas de líquidos e sólidos, compreendendo o barramento e as estruturas associadas”. A definição feita na resolução estabelece um padrão unificado, facilitando a comunicação entre os profissionais envolvidos, órgãos reguladores e partes interessadas, de forma a incentivar uma gestão mais eficaz dos recursos hídricos e contribuir para a segurança e sustentabilidade dessas estruturas.

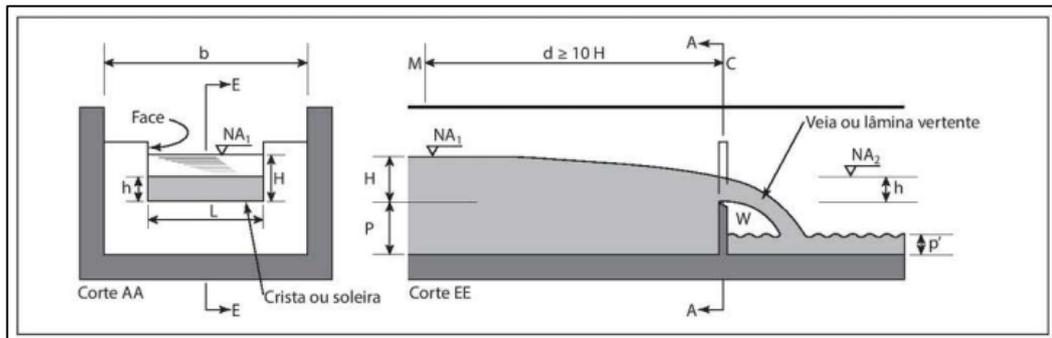
Não obstante, projetar uma barragem é um processo complexo. É necessária uma consideração detalhada de vários fatores, desde características geológicas, hidrológicas, topográficas, ambientais, além de toda segurança, associados a fatores econômicos. O controle eficaz do fluxo de água através da barragem e sua interação com a fundação são elementos fundamentais para garantir a segurança e o desempenho adequado da barragem.

Ao discorrer sobre barragens, é fundamental destacar a estrutura associada conhecida como vertedouro. Servindo como medidores de vazão dos cursos d'água, assim como no controle dos escoamentos, os vertedouros desempenham um papel muito importante nas barragens (AZEVEDO NETO, 1998). Eles podem ser classificados de muitas formas, conforme sua disposição:

1. Forma:
 - a. simples (retangulares, trapezoidais, triangulares, etc.);
 - b. compostos (seções combinadas).
2. Altura relativa da soleira:
 - a. vertedores completos ou livres ($p > p'$) (conforme Figura 1);
 - b. vertedores incompletos ou afogados ($p < p'$)
3. Natureza da parede:
 - a. vertedores em parede delgada (chapas ou madeira chanfrada);
 - b. vertedores em parede espessa ($e > 0,66 \times H$) (conforme Figura 2);
4. Largura relativa (Figura 2):
 - a. Vertedores sem contrações laterais ($L = b$) (conforme Figura 1);
 - b. Vertedores contraídos ($L < b$) (com uma contração e com duas contrações).
É considerado contraído o vertedor cuja largura é menor que a do canal de acesso.
5. Forma da lâmina vertente:
 - a. de lâmina livre (ou ventilada) (Figura 1);
 - b. de lâmina alterada (ou aderida ou deprimida);
 - c. de lâmina aderida.
6. Perfil da soleira:
 - a. arredondados;
 - b. de crista viva.
7. Posição da parede (das bordas);
 - a. de parede vertical;
 - b. de parede inclinada (Figura 2).
8. Posição do vertedor em relação à corrente:

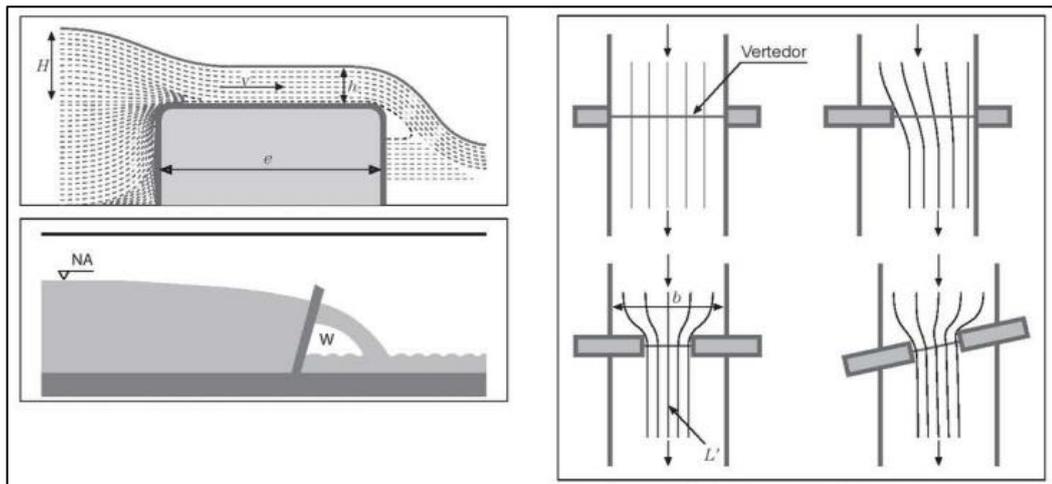
- a. normais ou perpendiculares;
 - b. laterais ou paralelos;
 - c. esconso (oblíquo).
9. Perfil do fundo:
- a. em nível;
 - b. em degrau.
10. Normatização:
- a. padrão ou standard;
 - b. particulares (não padronizados).

Figura 1 – Esquema de vertedor.



(Fonte: Azevedo Neto, 1998, p. 94)

Figura 2 - Vertedor de parede espessa (esquerda), inclinado (esquerda) e com diferentes contrações (direita)



(Fonte: adaptado de Azevedo Neto, 1998, p. 95)

A partir desta classificação de Azevedo Neto (1998), assim como de outros autores, foram construídas barragens variadas ao longo dos anos acompanhadas dos respectivos dispositivos extravasores.

Levando em conta que o controle de vazões é um dos fatores mais importantes no quesito obras hidráulicas, a geometria do vertedor não pode depender apenas de considerações hidráulicas (PORTO, 2006), acentuando a necessidade de se considerar características como estabilidade, topografia e o tipo da barragem na execução.

Nesse sentido, sistemas com vertedores-extravasores estão se tornando cada vez mais comuns, com a premissa de que haja um perfeito assentamento da lâmina vertente sobre toda soleira, além de promover um coeficiente de descarga máximo para o vertedor, evitar pressões negativas e por consequência problemas de cavitação no concreto (PORTO, 2006). Por esses e outros motivos, busca-se utilizar a forma geométrica mais apropriada para a estrutura, de modo a adequar o escoamento à lâmina.

3.2. ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS DE CALHA LISA

Seguindo a linha do item anterior, vários autores como Creager, Justin (1950), Scimemi apud Abecasis (1961), U.S. Army Corps of Engineers apud Chow (1959), entre outros, buscaram estudar de forma analítica ou com base em dados experimentais e trazer perfis de soleiras de alta eficiência hidráulica.

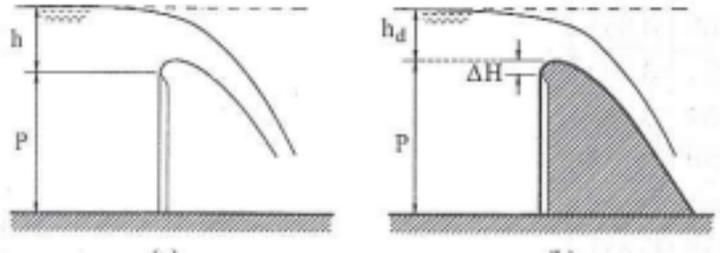
Nessa seção, serão abordados esses perfis clássicos, enfatizando os aspectos mais relevantes para este estudo.

3.2.1. Perfil de um vertedor-extravasador de soleira normal

Porto (2006) traz como premissa básica a ideia de um projeto de vertedor-extravasador de soleira espessa, desenhando-a seguindo o alinhamento da face inferior da lâmina vertente, com vertedor retangular e de parede fina (delgada), sem utilizar de contrações e feita de forma arejada. Essa premissa foi chamada de “soleira normal” e só pode ser utilizada para uma determinada vazão Q_d veiculada a pressão atmosférica local, esta que deverá ser encontrada ao longo de toda soleira do perfil. Como analogia, a Figura 3 apresenta a geometria da lâmina de um vertedor retangular de parede fina e o descarregador de soleira normal. Diferente do

vertedor de parede fina, onde a carga h é medida a partir da parede fina, no vertedor-extravador de soleira normal a carga h_d é medida a partir da crista: o ponto mais alto do perfil.

Figura 3 - Vertedor de parede fina (esquerda) e vertedor-extravador de soleira normal (direita)



(Fonte: Porto, 2006)

Experimentalmente, ABECASIS (1961) determinou que para esse tipo de perfil, a equação que corresponde seria:

$$\frac{y}{H_d} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x}{H_d}\right)^{1,85} \quad (1)$$

onde:

y – coordenada no eixo Y;

H_d – carga medida a partir da crista;

x – coordenada no eixo X

3.2.2. Perfil Creager

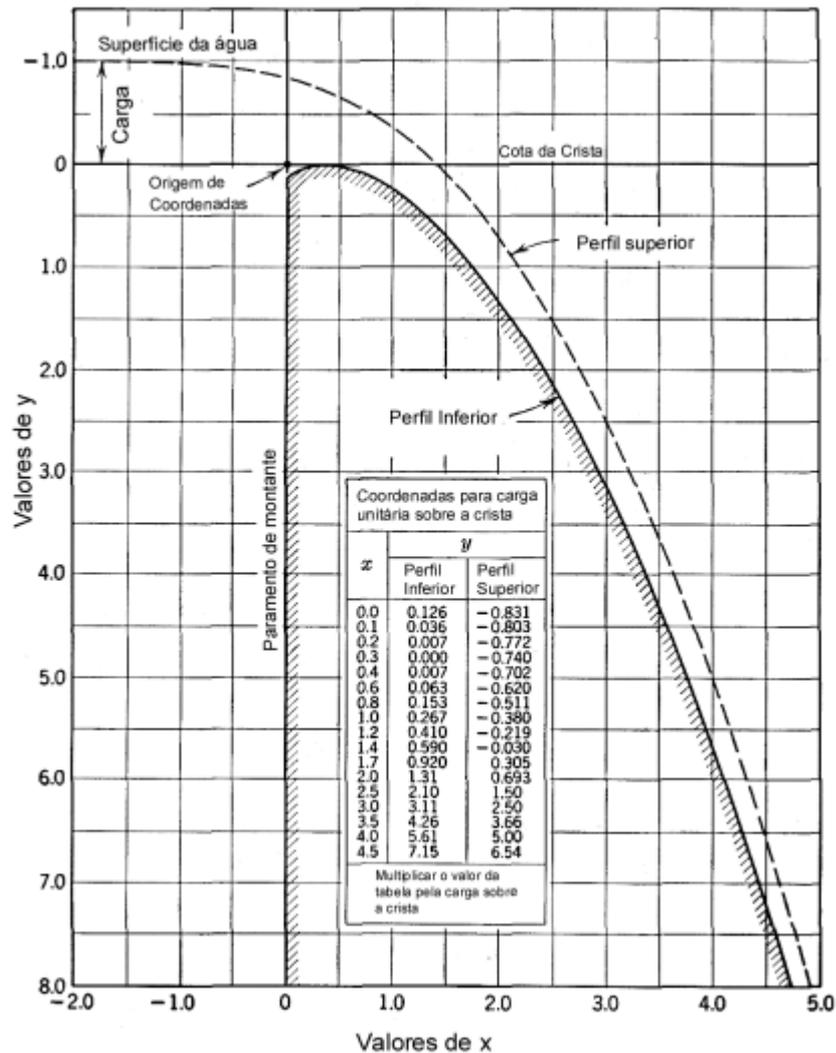
Sendo uma das soluções mais utilizadas, no Perfil Creager são adotados valores proporcionais às coordenadas indicadas na tabela da Figura 4, multiplicando os valores conforme a variação de altura H . De acordo com Azevedo Neto (1998), nas condições ideais de projeto, pode-se aplicar a seguinte expressão para a determinação da vazão escoamento sobre um vertedouro:

$$Q \cong 2,2 * L * H^{\frac{3}{2}} \quad (2)$$

onde:

- Q – vazão máxima
- L – comprimento da abertura do vertedor;
- H – carga de projeto.

Figura 4 - Perfil proposto por Creager



(Fonte: Creager e Justin, 1950 apud ARAUZ, 2005)

Diferente do perfil de soleira normal, o perfil Creager reside na rápida, e prévia, entrada da corrente d'água sobre o perfil inferior da lâmina vertente na soleira delgada, em contraste com a tangência apresentada no perfil de soleira normal (CREAGER e JUSTIN, 1950 apud ARAUZ, 2005). Scimemi obteve como equação que satisfaz o perfil Creager a seguinte formulação:

$$\frac{y}{H_d} = 0,47 \cdot \left(\frac{x}{H_d}\right)^{1,80} \quad (3)$$

onde:

- x e y - abscissa e ordenada do perfil do vertedor, respectivamente, com a origem no parâmetro de montante (em x) e na altura da crista (em y);
- H_d - carga de projeto;

3.2.3. Perfis do tipo USBR e WES

O U.S. Bureau of Reclamation (1966) conduziu múltiplas análises e chegou à conclusão de que a equação do perfil do vertedouro proposta por eles é dada pela Equação 3 apresentada abaixo. Nessa formulação, a configuração do perfil é influenciada pela carga hidráulica, pela inclinação da parede a montante, pelo nível da água a jusante e pela velocidade de aproximação (ARAUZ, 2005).

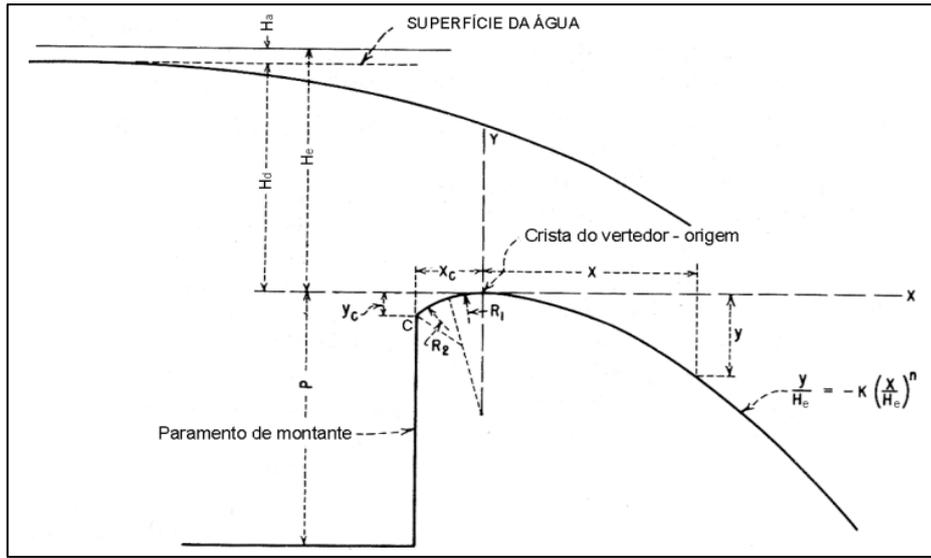
$$\frac{y}{H_e} = -K \cdot \left(\frac{x}{H_e}\right)^n \quad (4)$$

onde:

- x e y - abscissa e ordenada do perfil do vertedor, respectivamente, com a origem na crista;
- H_e - carga total sobre a crista;
- K e n - parâmetros que dependem da inclinação do paramento de montante e da velocidade de aproximação;

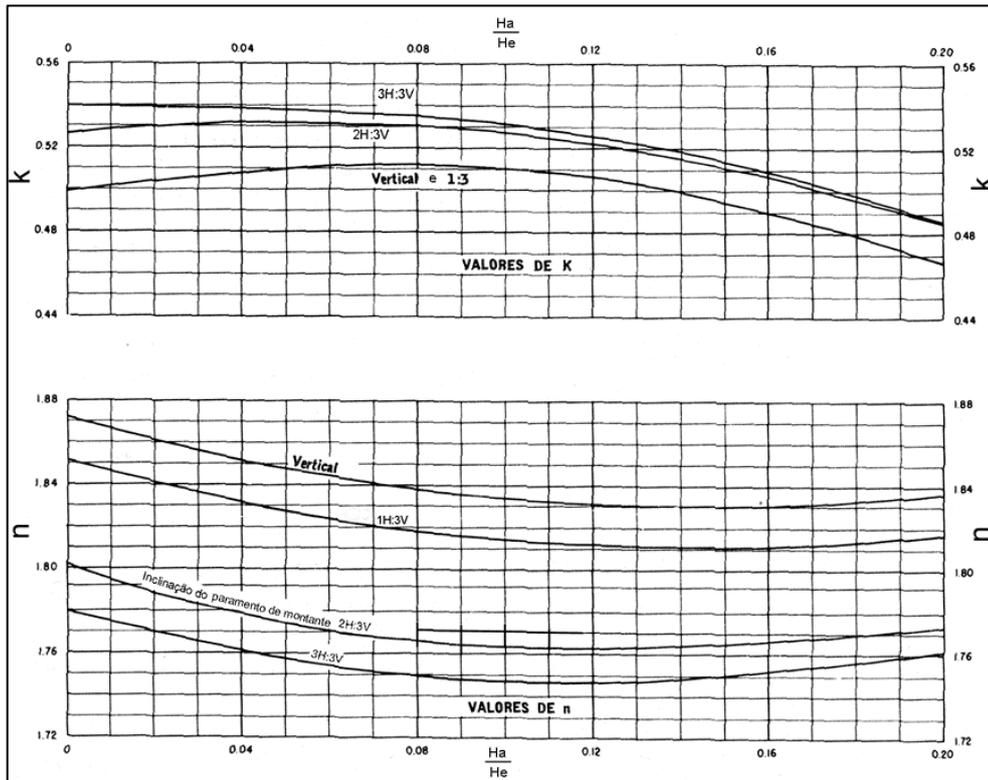
A Figura 5 compreende os elementos geométricos da Equação 3 apresentados anteriormente. Já a Figura 6 apresentará os parâmetros K e n da equação:

Figura 5 - Perfil proposto pelo USBR



(Fonte: USBR 1966, apud ARAUZ, 2005)

Figura 6 - Parâmetros k e N da Equação 3 do perfil apresentado pelo USBR (1966)



(Fonte: ARAUZ, 2005)

Semelhante ao proposto pelo USBR, a Waterways Experiment Station (WES), campus de pesquisa da U.S. Army Corps of Engineers, também propôs um modelo padrão com base

nos dados experimentais levantados. Como diferença, foi adicionado o seguinte: o parâmetro h_d representando a carga estática de projeto, desconsiderando a velocidade de aproximação, associado à vazão de projeto Q_d ; o valor exponencial do qual o último termo será elevado (que conforme a USBR, varia conforme o parâmetro n apresentado na Figura 6); e variações nos termos R_1 , R_2 , a e b conforme a Figura 7. A equação da WES é dada da seguinte forma:

$$Y = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{X}{h_d}\right)^n \quad (5)$$

onde:

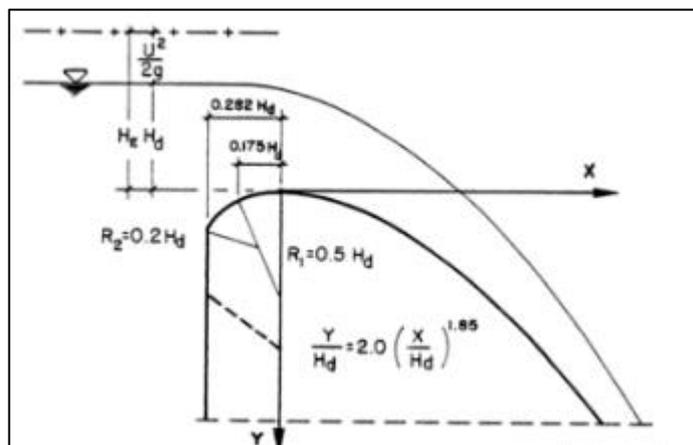
- X e Y - abscissa e ordenada do perfil do vertedor, respectivamente, com a origem na crista;
- h_d - carga estática de projeto;
- k e n - parâmetros que dependem da inclinação do paramento de montante e da velocidade de aproximação;

Tabela 1 - Inclinação do parâmetro a montante

Inclinação do paramento a montante	k	n
Vertical	2,000	1,850
3:1	1,936	1,836
3:2	1,939	1,810
3:3	1,873	1,776

(Fonte: Elaborado pelo autor, 2024)

Figura 7 – Perfil proposto pela WES



(Fonte: Şentürk, 1994)

3.2.4. Perfil Scimemi

Outra geometria reconhecida é a de Scimemi. Também possuindo suas semelhanças com a do perfil apresentado por Creager, é notada uma diferença na penetração da lâmina escoada do jato vertente sobre a soleira, subsequente da variação das pressões ocorrentes no perfil (ARAUZ, 2005). A formulação de Scimemi é expressa conforme abaixo:

$$\frac{Y}{H_d} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{X}{H_d} \right)^{1,85} \quad (6)$$

onde:

- X e Y - abscissa e ordenada do perfil do vertedor, respectivamente, com a origem na crista;
- H_d - carga estática de projeto;

3.3. PARÂMETROS HIDRODINÂMICOS DE ESTUDO

Na análise e dimensionamento de um vertedouro, cada parâmetro da estrutura influencia diretamente no seu funcionamento e na sua construção. Seja quando se altera a carga hidráulica de operação, a velocidade, pressão, todas se relacionam de forma que seja ímpar a necessidade de discutir sobre cada uma delas, como foi visto nas formulações de cada perfil apresentado no item anterior.

Nesse tópico, serão abordadas as especificidades dos parâmetros mais relevantes, em como eles se interagem e na predição da ocorrência de cavitação que pode ser gerada sobre o vertedouro.

3.3.1. Pressão

Conforme visto no estudo dos perfis, é intrínseca a importância de estudar como a pressão se comporta, além da sua relação direta com a geometria. A partir da análise das pressões ao longo da calha, é possível dimensionar um vertedouro para uma correta operação ao longo do tempo.

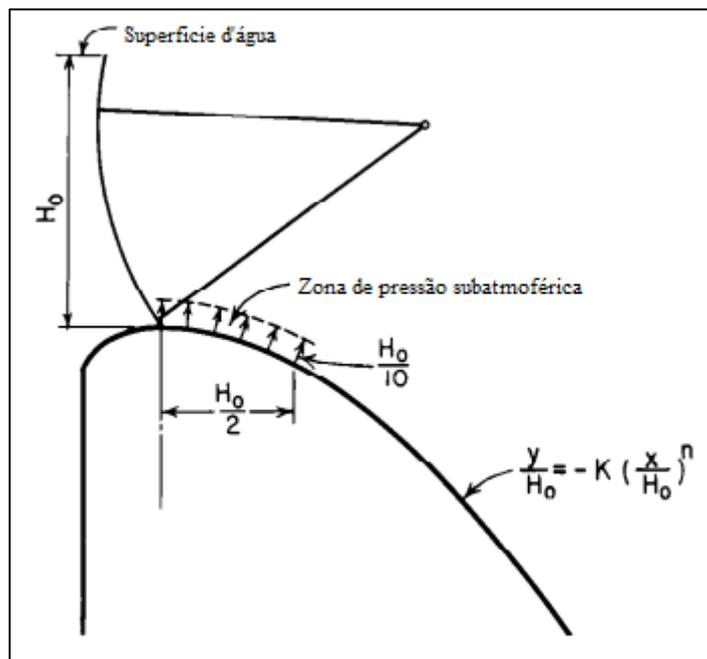
Se o perfil do vertedouro for projetado exatamente no formato da lâmina inferior de um escoamento livre, Chow (1959) afirma que a pressão na crista do vertedouro sob a carga de projeto teoricamente seria nula. Entretanto, geralmente acontecem modificações no perfil pois pressões negativas (menores que a P_{atm}) aumentam o coeficiente de descarga, e isso pode impactar positivamente na economia da barragem. Entretanto, estas devem ser evitadas pois podem trazer diversos problemas a estrutura, sendo importante buscar métodos de análise numérica e física para uma determinação mais exata das pressões ao longo da calha e assim, quantificar o quanto essas pressões negativas serão relevantes e prejudiciais.

Arauz (2005) traz um pouco sobre como é aconselhável que na distribuição de pressões ao longo do perfil de um vertedor sejam evitadas pressões negativas relevantes, pois podem levar ao descolamento da lâmina d'água, à ocorrência de vibrações e à cavitação. Essas pressões abaixo da pressão atmosférica podem prejudicar a estabilidade da estrutura, especialmente em vertedores de grande altura devido ao aumento do empuxo horizontal.

Considerando o vertedouro de soleira normal apresentado no item 3.2.1, Porto (2006) explica que na situação em que a carga de operação é menor que a carga de projeto ($h < h_d$), a soleira é dita *comprimida*, com funcionamento de pressões superiores a atmosférica local. Em contrapartida, quando $h > h_d$, a soleira é dita *deprimida* por haver pressões negativas, ou inferiores a atmosférica local. Estudos experimentais indicam por norma que a carga de operação deve cumprir a relação limite de $1,33h_d$ buscando evitar os efeitos de descolamento e cavitação.

Porém, quando se considera um vertedouro regulado por comportas, a mesma associação feita para com o vertedouro de soleira normal não pode ser aplicada. Isso é afirmado pois a relação entre a vazão escoada e a pressão se diferem da que acontece à soleira livre que, teoricamente, não haveria pressões na crista. Como apresentado pela USBR (1987), comportas parcialmente abertas devem ser consideradas como orifícios na barragem e levam em conta a trajetória do escoamento. Por consequência, logo no ponto de batente da comporta no perfil vertente geram-se pressões subatmosféricas relacionadas à carga de operação e ao ângulo de abertura da comporta. Na Figura 8 está ilustrado como, teoricamente, se comportam as pressões negativas num perfil modelo USBR com comportas:

Figura 8 - Zona de pressão subatmosférica em um perfil USBR com comportas



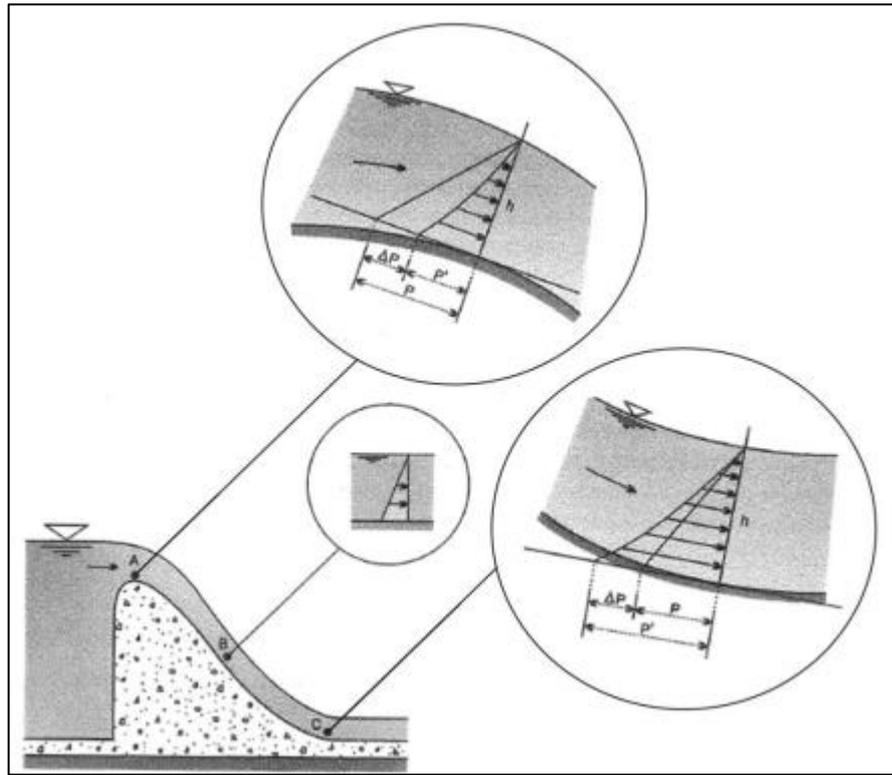
(Fonte: adaptado de USBR, 1987)

E por último, não se pode esquecer de citar quanto às variações de pressão ao longo do vertedor. Baptista e Lara (2010) trazem uma importante análise a ser feita no que diz respeito à variação das pressões em escoamentos livres. Levando em conta que, diferente de um conduto forçado onde a pressão se mantém constante na seção, uma ogiva de um vertedouro é composta por curvas explícitas e com diferentes pressões entre a superfície livre e o fundo, urge a necessidade de adentrar ao assunto pois fará influência nas análises futuras.

A partir da Figura 9, destaca-se três situações:

- Região A, parte côncava da estrutura com zonas de subpressão;
- Região B, parte inclinada, com zonas de pressão pseudo-hidrostatica;
- Região C, parte convexa da estrutura com zonas de sobrepressão.

Figura 9 - Distribuição de pressões ao longo de um vertedor.



(Fonte: BAPTISTA, LARA (2010), adaptado por OLIVEIRA (2023))

Teoricamente, a pressão na região B deveria ser calculada obedecendo a Lei de Stevens, que determina que ela seria proporcional a profundidade, tal qual:

$$P = \gamma \cdot h \quad (7)$$

Onde:

- P = pressão;
- γ = peso específico do líquido;
- h = profundidade do ponto considerado.

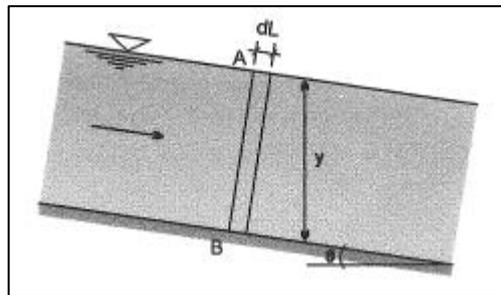
Todavia, essa hipótese só se aplica a canais retilíneos que não possuem uma relativa inclinação. E, com essa inclinação em evidência nos vertedouros, a distribuição de pressões deixa de ser uma distribuição hidrostática qualquer, sendo nomeada, segundo Chow (1959), como pseudo-hidrostática:

$$P_B = \gamma \cdot y \cdot \cos^2 \theta \quad (8)$$

Onde:

- P_B = pressão relativa ao ponto B, conforme a Figura 10;
- y = distância vertical da superfície até o fundo;
- γ = peso específico do líquido;
- θ = ângulo relativo a inclinação.

Figura 10 - Variação da distribuição de pressões no trecho reto com declividade



(Fonte: BAPTISTA, LARA (2010))

Seguindo Baptista e Lara (2010), pode-se introduzir um critério para fins de simplificação, do qual estruturas com declividade menor igual a 10% considera-se uma distribuição hidrostática, e para maiores que 10% considera-se a distribuição pseudo-hidrostática de pressões.

Já para as pressões nos pontos A e C, observa-se uma mudança no gradiente de pressões em vista da curvatura das linhas de corrente. Em vista de ser um escoamento bruscamente variado com componentes de aceleração tangenciais e normais, Baptista e Lara (2010) afirmam haver um fator de aumento ou diminuição da pressão local. Este pode ser calculado, seja positivo em fundos côncavos e negativo em fundos convexos, da seguinte forma:

$$P' = P \pm \frac{\Delta P}{\gamma} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta P}{\gamma} = \frac{h \cdot v^2}{g \cdot R} \quad (10)$$

onde:

- P' = pressão corrigida, conforme a Figura 9, em m.c.a.;
- P = pressão hidrostática ou pseudo-hidrostática;
- ΔP = fator de correção da pressão;
- v é a velocidade média do escoamento;
- R é o raio de curvatura do fundo;
- γ = peso específico do líquido;
- h = profundidade do ponto considerado.

3.3.2. Coeficiente de Descarga e Vazão

Em relação aos parâmetros que caracterizam o escoamento sobre o vertedouro, dois deles se relacionam intrinsecamente: o coeficiente de descarga e a vazão correspondente. Para cada tipo de perfil, os autores trazem equações conforme suas pesquisas e resultados. Cabe ressaltar que como as pressões variam conforme os diversos fatores, sejam eles o nível do reservatório, cotas de terreno, perfil da ogiva, cargas de projeto, abertura de comportas e ponto de batente, entre outros, acabam que esses sejam determinantes inicialmente para então calcularmos o coeficiente de descarga e a vazão determinante.

A expressão geral da vazão escoada em um perfil de soleira normal, sem comportas e pilares, é dada da seguinte forma:

$$Q_d = C_0 \cdot L_{ef} \cdot h_d^{\frac{3}{2}} \quad (11)$$

onde:

- Q_d – vazão de projeto;
- C_0 – coeficiente de vazão, função de h/h_d ;
- L_{ef} – largura efetiva de abertura;
- h_d - carga de projeto.

Havendo pilares, deve-se considerar o seguinte para o L_{ef} (12) e h_a (13):

$$L_{ef} = L - 2 \cdot (n \cdot K_p + K_a) \cdot H_0 \quad (12)$$

onde:

- L – comprimento total;
- n – número de pilares;
- K_p – coeficiente de contração no pilar;
- K_a – coeficiente de contração na aproximação;
- H_0 – soma da carga de projeto (h_d) e carga de velocidade (h_a);
- g – aceleração da gravidade.

$$h_a = \frac{v_t^2}{2 \cdot g} \quad (13)$$

E para vertedouros de perfil normal controlados por comportas, Arauz (2005), apud WES (1988) traz a seguinte equação:

$$Q_d = C_0 \cdot a \cdot L_{ef} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h_d} \quad (14)$$

onde:

- a – abertura efetiva da comporta ;
- C_0 – coeficiente de vazão, função de h/h_d ;

O coeficiente de descarga possui várias condicionantes para determiná-lo. Esse parâmetro depende bastante das linhas de aproximação do escoamento, e por isso a necessidade de definir previamente qual perfil será utilizado na construção do vertedouro e o tipo de comporta (se houver). Para isso, é feita também uma análise geométrica para melhor dimensionamento para assim evitar descolamentos da lâmina, manter limites de altura piezométrica e eximir de problemas com cavitação ao longo da ogiva.

3.3.3. Cavitação

De maneira geral, esse fenômeno acontece quando há a formação de cavidades de vapor em meio a massa líquida, como traz Lopes (1944). Mesmo sendo conhecido a bastante tempo, só em meados do século passado que houve um progresso relativo nos estudos ao

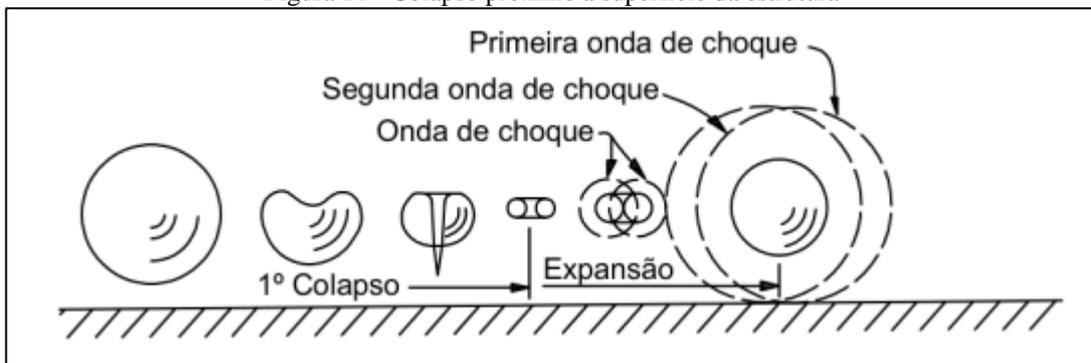
ponto de ser dada a sua devida importância. Não obstante, observou-se que quanto maiores as velocidades a partir de um determinado limite, maior era o aumento do escorregamento em hélices de maquinários hidráulicos, assim como era acompanhado de corrosões nítidas de grande intensidade, estas que eram diferentes das reações químicas ou galvânicas que também se faziam, por vezes, presentes.

De acordo com LOPES 1944:

Se num líquido em movimento, à temperatura ordinária, a pressão estática em qualquer ponto desce até ao valor da tensão do vapor à mesma temperatura, formam-se cavidades, originando-se assim o fenômeno designado por cavitação [...].

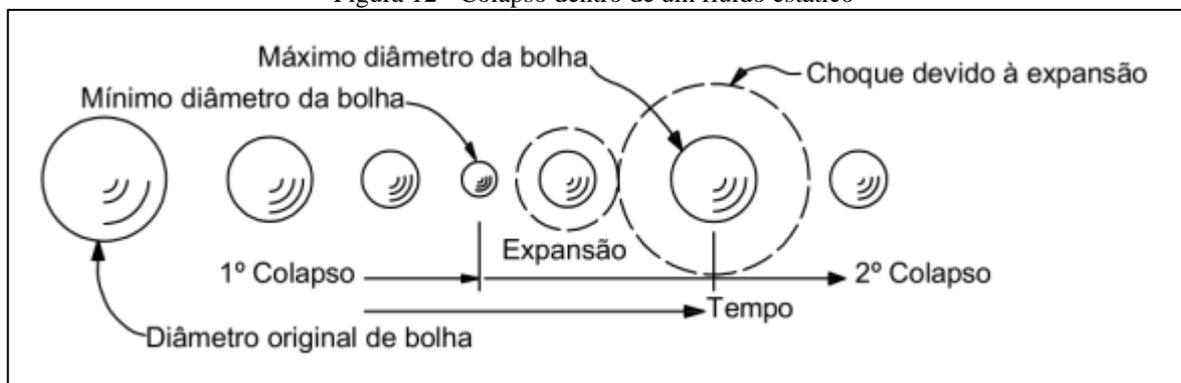
Com a formação e desenvolvimento dessas cavidades (ou bolhas de vapor) em zonas de baixa pressão, essas são transportadas pelo escoamento para regiões de maior pressão. Com isso, gera-se um colapso das bolhas nas superfícies próximas do revestimento, prejudicando a estrutura hidráulica ou afetando regiões internas do fluido. Para ilustrar essas duas situações, tem-se as Figura 11 e Figura 12:

Figura 11 - Colapso próximo a superfície da estrutura



(Fonte: Falvey (1990), adaptado por ABREU (2022))

Figura 12 - Colapso dentro de um fluido estático



(Fonte: Falvey (1990), adaptado por ABREU (2022))

Pensando em quantificar esse parâmetro, além de combinar elementos como velocidade do escoamento, pressão do escoamento e pressão de vapor da água, Falvey (1990) faz uma comparação da equação de Bernoulli (Equação (15)) para definir o que ele chama de coeficiente de pressão e índice de cavitação (Equações (16), (17) e (18)):

$$\frac{\rho \cdot V_0^2}{2} + P_0 + Z_0 \cdot \rho \cdot g = \frac{\rho \cdot V^2}{2} + P + Z \cdot \rho \cdot g \quad (15)$$

onde:

- P – intensidade da pressão;
- P₀ – pressão de referência;
- V – velocidade do escoamento;
- V₀ – velocidade de referência;
- Z – elevação;
- Z₀ – elevação de referência;
- g – aceleração da gravidade;
- ρ – densidade da água.

$$C_p = \frac{(P + Z \cdot \rho \cdot g) - (P_0 + Z_0 \cdot \rho \cdot g)}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = \frac{E_f - E_0}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = 1 - \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \quad (16)$$

onde:

- C_p – coeficiente de pressão ou número de Euler;
- E_f – energia potencial do escoamento;
- E₀ – energia potencial do ponto de referência.

Considerando que o termo da gravidade é relativamente pequeno em comparação ao termo da pressão, reescreve-se a equação da seguinte forma:

$$C_p = \frac{P - P_0}{\rho \cdot V_0^2 / 2} \quad (17)$$

Esse coeficiente de pressão, ou número de Euler, corresponde a mínima pressão do corpo da qual a pressão de vapor da água é maior (FALVEY, 1990). Como parâmetro resultante, o índice de cavitação é definido pela próxima equação:

$$\sigma = \frac{E_0 - Z \cdot \rho \cdot g - P_v}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = -(C_p)_{\min} \quad (18)$$

onde:

- P_v – pressão de vapor da água;
- σ – índice de cavitação.

Além dos dois tipos de colapsos quanto ao posicionamento das bolhas, é possível definir também a maneira da qual pode ocorrer. TULLIS (1982) e FALVEY (1990), apud ABREU (2022), trazem que, quando a pressão local do escoamento se aproxima da pressão de vapor, as bolhas atingem um diâmetro crítico, o que gera um colapso por explosão. A outra forma, concomitante a essa, é a por implosão: quando a pressão nos arredores das bolhas for maior do que a pressão de vaporização do líquido. É importante ressaltar cuidado neste tipo de colapso pois quando os espaços vazios são preenchidos por partículas, gera-se um choque que remete ao golpe de aríete, gerando pressões muito relevantes no escoamento.

Outro cuidado que deve ser verificado é quanto ao índice de cavitação (σ) visto previamente com o índice de cavitação crítico (σ_{cr}). Esse índice crítico é determinado conforme a existência e forma das irregularidades encontradas na estrutura e, conforme definida, cria-se exigências de projeto para compensar e prevenir possíveis danos por cavitação. FALVEY (1990) especifica determinados limites para a situação onde não há irregularidades no escoamento (como se espera em um vertedouro de calha lisa) onde, a partir de tensões tal qual $\sigma_{cr} < 0,20$, critérios devem ser seguidos para a execução da estrutura. E, com base em observações de protótipos de vertedores, sumarizou os limites críticos de cavitação da seguinte forma:

Tabela 2 - Critérios a serem considerados no projeto na prevenção de danos por cavitação.

Índice de cavitação crítico σ_{cr}	Exigências do projeto
> 1,80	Nenhuma proteção contra a erosão por cavitação é requerida.
0,25 - 1,80	O contorno sólido pode ser protegido por tratamento superficial, por exemplo, suavizando todas as irregularidades da superfície.
0,17 - 0,25	Modificação do projeto, por exemplo, através do aumento da curvatura do contorno sólido.
0,12 - 0,17	Proteção por aeração induzida por aeradores do tipo ranhura ou degrau.
< 0,12	O contorno sólido não pode ser protegido e deve-se assumir outra configuração.

(Fonte: elaborado pelo autor (2024), adaptado de Falvey (1990))

3.3.4. Velocidade Média

Além da análise quanto aos índices de cavitação, outro parâmetro utilizado na avaliação de estruturas é a velocidade média. Por ser ligado à geometria do perfil, assim como atrelado diretamente às ocorrências de cavitação de barragem, a verificação do parâmetro quanto aos limites máximos e/ou mínimos do escoamento acaba por se tornar tão relevante quanto os critérios de índice crítico de cavitação.

Diante disso, Falvey (1990) e Ball (1959) são alguns dos autores que indicam a necessidade de verificar as irregularidades significativas na superfície do vertedouro. Na tabela a seguir serão apresentados alguns limites de forma categorizada buscando reduzir o favorecimento de danos a estrutura:

Tabela 3 - Limites apresentados por Falvey (1990) para velocidades

Autor: Falvey (1990)	Velocidade	Observação
Velocidade Leves	$V > 10\text{m/s}$	Deve-se observar mais atentamente
Velocidades Graves	$V > 30 \sim 35 \text{ m/s}$	Gera-se alto risco de cavitação

(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Tabela 4 - Limites apresentados por Ball (1959) para velocidades

Autor: Ball (1959)	Velocidade	Observação
Velocidade Leves	$V > 15\text{m/s}$	Deve-se observar mais atentamente
Velocidades Graves	$V > 25 \text{ m/s}$	Gera-se alto risco de cavitação

(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Para velocidades menores que as leves, menores que 10 m/s para Falvey (1990) e 15 m/s para Ball (1959), os autores indicam não haver riscos eminentes de cavitação, pensando numa superfície bem acabada e sem irregularidades. A partir das velocidades leves, o risco se torna maior e deve ser observado com mais atenção e, a partir das velocidades graves, maiores que 30 m/s para Falvey (1990) e 25 m/s para Ball (1959), a exposição é muito maior ao risco de problemas por cavitação, devendo ser evitadas se não controladas.

3.4. DANOS EM SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS DE CONCRETO

Sendo a cavitação um dos fenômenos mais significativos e potencialmente prejudiciais as estruturas, cabe-se dar ênfase a esse parâmetro na análise de danos às superfícies. Diversos autores como Macintyre (1997), Knapp, Dailly e Hammit (1970) abordam sobre a suscetibilidade dos materiais em serem danificados pelo parâmetro quando submetidas a esforços hidrodinâmicos consideráveis e, por isso, gera-se a necessidade de definir sabiamente quais materiais serão utilizados na construção de estruturas, independente do viés da obra.

Quando se utiliza de concretos mais resistentes e de melhor acabamento, tem-se a tendência deste sofrer menos danos em ambientes suscetíveis ao parâmetro. Utilizando

maneiras de aumentar a resistência do concreto com a utilização de revestimentos de aço, concretos com adição de polímeros, resina epóxi, ou fibras, é possível encontrar melhores resultados, como visto em Carvalho (1997) quando utilizado em zonas de ligação ou de blindagem desconectada do concreto. Chow (1959) reforça isso quando fala que a força do agregado não é normalmente o fator preponderante, mas que “a resistência do concreto é determinada pela coesão interna do ligante e pela adesão deste com o agregado”.

A partir de experimentos conduzidos por Inozemtsev et al (1965), são trazidas indicações dos melhores resultados encontrados por ele na formulação do concreto. Ao se utilizar de agregados porosos, sendo eles tão similares o possível com o concreto, é possível encontrar melhores rendimentos quanto resistência a cavitação, se tratando de concreto.

Chow (1959) traz também quanto as irregularidades das superfícies. Ao analisar predições teóricas de pressões mínimas em razão das irregularidades, assim como medições em laboratório e outros métodos para se determinar a cavitação, encontrou resultados razoáveis justificando que, mesmo havendo discrepâncias entre as superfícies, elas ainda não se comparavam com os efeitos de pequenas mudanças que poderiam ser feitas modificando o perfil do vertedouro de barragem.

Para reforçar Chow, Macintyre (1997) traz também sobre o fenômeno da vibração das estruturas. Através dessas vibrações, há uma propagação contínuo de ondas que, ao se chocarem, alteram a coesão interna do concreto (além de outros materiais), enfraquecendo pontualmente a resistência dos cristais de formação do material, assim como o aumento de temperatura poderia gerar espaço para que as pressões de colapso das bolhas desagreguem as partículas do material.

Em suma, há diversas maneiras em que a escolha dos materiais e a forma de execução do concreto se tornam fatores resultam em uma menor durabilidade do vertedouro da barragem. Creager, Justin (1950) apontam que “a qualidade estrutural do concreto está intimamente relacionada a qualidade estrutural do agregado que o compõe, sendo arriscado concluir que, mesmo o cimento e o agregado testados se provem duráveis, o concreto será igualmente também”. Mesmo assim, cabe escolher devidamente qual tipo de cimento e agregados finos e grossos devem ser utilizados.

Considerando o cimento Portland um dos mais utilizados, e considerando seus 5 tipos, Creager, Justin (1950) indicam, entre alguns deles, qual é mais apropriado para cada situação:

- Tipo II: sendo deles o tipo de cimento mais modificável, acaba sendo popular para estruturas onde há exposição moderada de sulfatos, de calor de hidratação como uma característica essencialmente presente ou há necessidade de especificar certos testes químicos e físicos como requisito;
- Tipo IV: utilizado principalmente para concretos maciços onde é necessário limitar a temperatura máxima e criar a maior resistência a rachaduras possível, como apontado por Macintyre quanto ao aumento da temperatura diante das propagações contínuas de ondas que geram vibrações na estrutura;
- Tipo V: para situações onde a qualidade da resistência é especialmente necessária para suportar condições severas de alcalinidade.

Já os agregados definem diretamente pontos como trabalhabilidade e durabilidade do concreto. Para isso, devem ser testadas e escolhidas previamente ao invés de simplesmente utilizar de uma areia manufaturada qualquer com partículas de forma de grão angular ou utilizar britas sem o devido controle de uniformidade dos tamanhos. A partir de um correto/apropriado peneiramento como Creager, Justin (1950) trazem, é possível encontrar resultados mais satisfatórios como se é desejado.

Mesmo assim, sabendo que as estruturas hidráulicas podem entrar em colapso ou sofrer com danos significativos ao longo do tempo, é importante buscar soluções a se adotar caso aconteça. Para isso, é comum a adoção de modificações estruturais como introduzir aeradores ou rampas, ou apenas regularizar a superfície, dependendo dos índices de cavitação encontrados. Nas imagens a seguir, é possível ver claramente os danos gerados no extravasor de uma barragem na Califórnia, por cavitação:

Figura 13 - Extravasor da barragem de Oroville, Califórnia



(Fonte: SAFF Engenharia, 2020)

Figura 14 - Danos gerados por cavitação no extravasor da barragem de Oroville



(Fonte: Time, 2017)

4. METODOLOGIA

Neste capítulo, será descrita a metodologia utilizada para estimar os parâmetros vistos: pressão média, velocidade média e índice de cavitação. Serão apresentados os dados obtidos para o estudo, as considerações e análises feitas, assim como as etapas e formulações utilizadas no programa SpillwayPro para os resultados utilizando da estrutura da Usina Hidrelétrica de Furnas.

Destaca-se que este estudo se limitou à análise dos dados obtidos experimentalmente, não envolvendo participação do autor na instalação experimental, nem na coleta de dados durante a condução dos ensaios. Os dados obtidos para esse trabalho foram disponibilizados pela Eletrobrás-FURNAS, originados do Relatório P&D ANEEL N° 00394-1706/2017 - Concepção e Projeto Dos Modelos/Estruturas/Dispositivos de Ensaio (R4.2) - Furnas, elaborado pelo Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia na Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica.

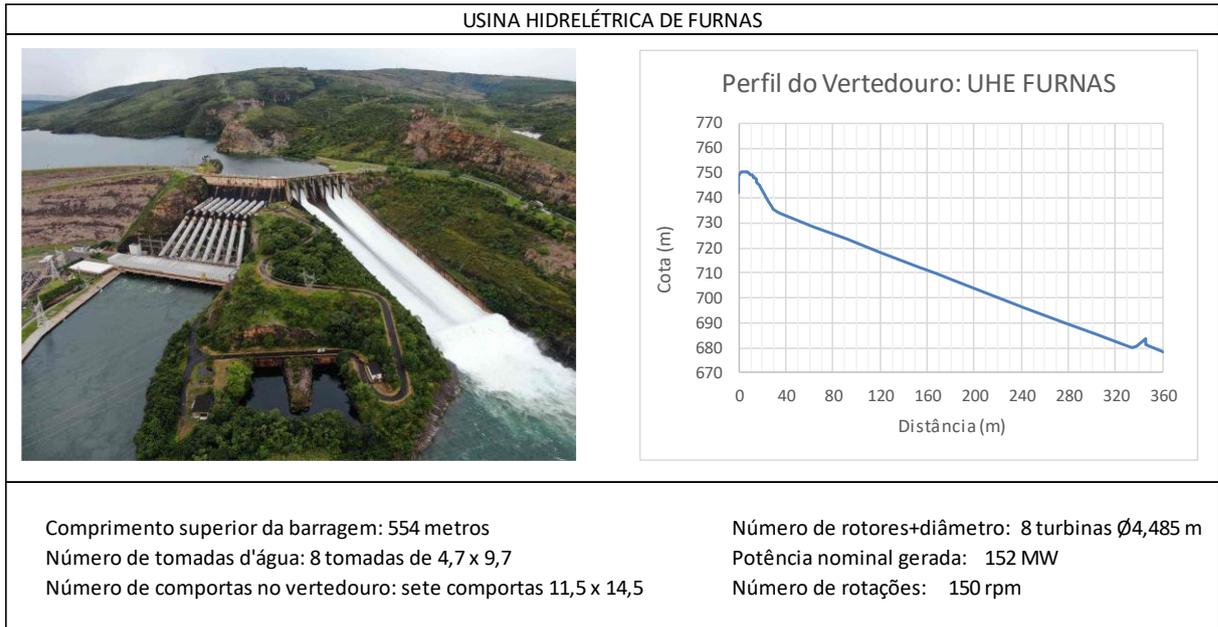
4.1. CARACTERÍSTICAS DA ESTRUTURA HIDRÁULICA

A Usina hidrelétrica de Furnas é localizada em Minas Gerais, entre os municípios de São José da Barra e São João Batista do Glória. Sua construção iniciou em 1958, sendo finalizada e inaugurada em 1963, possuindo um total de oito unidades de geração, com uma capacidade de gerar um total de 1216 MW. A barragem possui 127 metros de altura, formada pelo enrocamento com núcleo de argila. Seu vertedor foi projetado para extravasar uma vazão máxima de até 13000 m³/s.

Para as simulações, foram utilizadas informações obtidas quanto a geometria da UHE Furnas, além de outras considerações. Esses dados incluem o perfil da própria estrutura descarregadora de cheias, além de perfis da linha d'água para diferentes vazões, estas que possuem coordenadas ao longo da ogiva para determinar a posição da lâmina na estrutura. Além disso, cabe trazer que a estrutura opera de duas formas: com comporta e sem comporta, entretanto, foram utilizados apenas dados referentes a comporta totalmente aberta.

Na Figura 15, serão apresentadas algumas informações gerais e o perfil da Usina Hidrelétrica de Furnas, enquanto que na Figura 16 foi salientado o vertedouro, na tentativa de uma melhor visualização:

Figura 15 - Quadro resumo da UHE FURNAS



(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Figura 16 - Vertedouro da Usina Hidrelétrica de Furnas, Minas Gerais



(Fonte: Tiago Costa, 2010)

Como principais parâmetros a serem utilizados, destacam-se as configurações físicas da barragem e algumas características hidráulicas da estrutura de vertimento. Tendo esses dados, foi possível utilizá-los, como parâmetros de entrada, nas simulações geradas no software SpillwayPro, este que será descrito no próximo tópico. Com ele, determinou-se analiticamente o comportamento do escoamento, nas situações em operação a serem apresentadas.

4.2. SOBRE O MODELO

Através da ação cooperada entre Furnas Centrais Elétricas, Foz do Chapecó Energia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e seus respectivos laboratórios (LAHE e LOH-IPH), houve uma implementação e execução do P&D ESTUDO DE CONCRETO PARA SUPERFÍCIES HIDRÁULICAS. A partir dessa pesquisa, houve uma análise das características hidráulicas de UHE's, que incluem a Usina Hidrelétrica de Furnas, e a criação de modelos reduzidos que compreendem uma parcela da estrutura extravasora de cada uma delas.

A construção do modelo se deu nas instalações do LAHE, laboratório de propriedade de Furnas Centrais Elétricas, em um canal das instalações experimentais. Dado o espaço disponível, criou-se modelos reduzidos do qual foi adotado, para a UHE Furnas, a escala geométrica 1:45, ou seja, 1 unidade do modelo equivale a 45 unidades de comprimento no protótipo. A escala geométrica dos extravasores foi definida pelo critério da Lei de Semelhança do Número de Froude, permitindo a análise e ensaios no modelo que poderiam ser aplicados em escalas reais, mesmo com suas limitações.

Como características do modelo, será apresentado na Tabela 5 as informações referentes ao protótipo (estrutura real) e os do modelo:

Tabela 5 - Características do modelo do sistema extravasor da UHE Furnas

Característica	Protótipo	Modelo
Escala geométrica	-	1:45
Vazão máxima por vão (m ³ /s)	1857	0,137
Número de vãos representados	2,00	2,00
Vazão máxima total (m ³ /s)	3714	0,273
Nível d'água máximo acima da soleira (m)	18,50	0,41
Comprimento total do sistema extravasor (m)	345,80	7,70
Altura total do sistema extravasor (m)	90,00	2,00
Largura total do sistema extravasor (considerando o número de vãos representados, m)	29,00	0,64

(Fonte: P&D Concepção e Projeto Dos Modelos/Estruturas/Dispositivos de Ensaio (R4.2), 2020)

A partir dessas configurações, foram feitos ensaios que resultaram nos dados de modelo obtidos. Estes consistiam, de forma resumida, em:

- Cotas topográficas da estrutura física da usina;
- As seções/pontos de controle utilizados para os resultados;
- As vazões utilizadas em m³/s: 1150, 1985, 2500, 3800, 4670, 8500 e 1300;
- Perfil da linha d'água e as cotas da superfície livre (exceto para Q = 8500m³/s);
- Nível d'água, cotas piezométricas e pressão para cada uma das vazões

Os dados quanto aos parâmetros velocidade e índice de cavitação, no modelo, não foram apresentados. Por consequência, eles foram calculados manualmente para que fosse possível compará-los com os resultados das simulações via SpillwayPro. Para as velocidades, adotou-se da equação da continuidade (Equação (19)), utilizando as vazões analisadas e a altura da lâmina d'água associadas a cada seção. Além disso, a determinação da largura para o parâmetro de área foi realizada de maneira simplificada, sendo a soma das larguras de cada comporta (7 x 11,5 m) mais a largura dos pilares (6 x 3,0 m).

$$Q = V \cdot A \rightarrow Q = (L \cdot y) \cdot A \rightarrow V = \frac{Q}{(L \cdot y)} \quad (19)$$

Onde:

- Q = vazão em análise;
- V = velocidade;
- A = área molhada da estrutura;
- L = largura total do vertedouro;
- y = altura de água.

Para obter os valores associados ao índice de cavitação do modelo, utilizou-se da Equação (18), apresentada novamente a seguir, em conjunto dos valores calculados para a velocidade. Não obtendo-se dados para a lâmina d'água para vazão de $Q = 8500 \text{ m}^3/\text{s}$, não foi possível calcular a velocidade, assim como os valores do índice de cavitação para vazão em questão, o que conduziu a análise dos resultados a serem comparativos entre as vazões de $1150 \text{ m}^3/\text{s}$ e $4670 \text{ m}^3/\text{s}$ (a menor e segunda maior vazão entre as analisadas no estudo).

$$\sigma = \frac{E_0 - Z \cdot \rho \cdot g - P_V}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = -(C_P)_{\min} \quad (18)$$

4.3. SOBRE O SOFTWARE SPILLWAYPRO

O software SpillwayPro é um spreadsheet criado pela United States Bureau of Reclamation (USBR) com o objetivo de permitir a análise de perfis da superfície d'água gerados, assim como apontar focos de ocorrência do parâmetro cavitação ao longo da ogiva e da calha do vertedouro. Tendo isso em mente, a partir das premissas validadas, é possível otimizar o perfil do vertedouro a ser concebido, assim como prever possíveis regiões de ocorrência de danos por cavitação, seja durante o estudo de viabilidade da construção, ou em estruturas já construídas.

Sendo modificado/melhorado desde 2021, o software segue sofrendo atualizações na busca de aprimorar o método utilizado nos cálculos da simulação. A partir da energia específica, declividade da calha e da perda de carga entre cada seção adotada, gera-se uma estimativa da altura da linha d'água, através do método do remanso.

Para utilizar o SpillwayPro, foi necessário inserir dados na aba Input Geometry, apresentado na Figura 17 a seguir. Com base neles, são reproduzidos os resultados da simulação na aba Output Hydraulic, assim como de outras abas subsequentes, dependendo dos parâmetros adicionados. Como não há aeração forçada, nem degraus no vertedouro da Usina Hidrelétrica de Furnas, esses resultados não serão computados nem apresentados nesta análise.

Figura 17 – Aba Input Geometry - SpillwayPro

INPUT - Spillway Geometry												
Highlight Input Cells		AUTOR: GIANLUCA ARNOLD BORGES					Compute Invert Curvatures		Compute Flow Profile & Cavitation Properties			
Clear Highlights							Show Section Help					
Discharge, Q	Initial Depth, Y _o	Initial Slope	Computation Direction	Units	Default Rugosity	Crest Station	Crest Elevation	Aeration Calculations	Reservoir Elevation	Stepped Training Wall F.S.	Step Face	
m ³ /s	m	m/m			m	m	m		m	-	-	
164,29	1,70	0,0274297	DS	Metric	0,001	0,00	750,80	Disabled	754,65	1,5	Vertical	
Section	Station	Invert Elevation	Width, Diameter, or Invert Radius	Side Slope, Upper Fillet or Crown Radius	Height or Side Radius	Lower Radius or Height of Crown Radius	Pier Width or Height of Side Radius	Invert Curvature Radius	Rugosity	Step Height		
	m	m	m	- or m	m	m	m	m	m	m		
Rectangular	0,00	750,80	11,500	0,000				-7,6	0,001	0		
Rectangular	0,50	750,79	11,500	0,000				-11,8	0,001	0		
Rectangular	1,37	750,71	11,500	0,000				-13,5	0,001	0		
Rectangular	1,95	750,63	11,500	0,000				-14,8	0,001	0		
Rectangular	2,58	750,52	11,500	0,000				-15,9	0,001	0		
Rectangular	3,50	750,30	11,500	0,000				-17,2	0,001	0		
Rectangular	4,50	750,00	11,500	0,000				-18,8	0,001	0		
Rectangular	5,50	749,64	11,500	0,000				-20,5	0,001	0		
Rectangular	6,50	749,22	11,500	0,000				-22,4	0,001	0		
Rectangular	7,50	748,74	11,500	0,000				-24,5	0,001	0		
Rectangular	8,50	748,21	11,500	0,000				-26,4	0,001	0		
Rectangular	9,00	747,92	11,500	0,000				-28,5	0,001	0		
Rectangular	10,00	747,30	11,500	0,000				-30,7	0,001	0		
Rectangular	11,00	746,63	11,500	0,000				-33,6	0,001	0		
Rectangular	12,00	745,90	11,500	0,000				-36,8	0,001	0		
Rectangular	13,00	745,14	11,500	0,000				-40,2	0,001	0		

(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

4.3.1. DADOS DE ENTRADA

Para as simulações, cabe explicar cada um dos parâmetros a serem definidos/adicionados ao programa. Quando adicionados, é possível iniciar os cálculos que geram a simulação, através das ferramentas *Compute Invert Curvatures* (computar raio de curvatura invertido) e *Compute Flow Profile e Cavitation Properties* (computar propriedades do fluxo no perfil e cavitação), estas que irão gerar os resultados da aba Output Hydraulic. A explicação quanto aos parâmetros da aba Input Geometry, conforme Figura 12, serão apresentados a seguir:

- Descarga, Q (célula A7): a vazão associada ao vertedouro. O valor utilizado para cada análise foi dividido entre as sete, considerando número de comportas de comprimento 11,50 m;
- Profundidade inicial, Y_0 (célula B7): valor iterado pelo programa utilizando o método de Newton-Raphson para se ajustar conforme a crista da estrutura e a elevação do reservatório utilizada;
- Declividade (célula C7): valor encontrado a partir do cálculo na primeira seção da estrutura. Será explicado logo a baixo, junto de alguns fatores importantes na rotina de cálculo do método do remanso;
- Direção computada (célula D7): direção para qual o escoamento segue seu curso;
- Unidades (célula E7): metros, conforme unidades brasileiras;
- Rugosidade (célula F7): definida conforme rugosidade da estrutura. Foi adotado nas simulações o valor de 0,001;
- Estação da crista (célula G7): posição no eixo X da crista da barragem, sendo necessariamente também a primeira estação adicionada no programa;
- Elevação da crista (célula H7): posição no eixo Y da crista da barragem, sendo necessariamente também a primeira elevação adicionada no programa;
- Cálculos de aeração (célula I7): definição se seria computada/considerada aeração na simulação (não foi considerado nesta análise);
- Elevação do reservatório (célula J7): nível do reservatório para a vazão aplicada a célula A7. Foram utilizados os mesmos dados do modelo;
- Células K7 e L7: relacionadas ao fator de segurança e a inclinação de chanfros no sistema (não foi considerado nesta análise).

É necessário também adotar pontos de controle para se gerar os perfis. Para cada ponto, se deverá inserir o tipo de seção, a elevação do ponto e a posição em x, conforme a referência do programa: o ponto da crista do vertedouro. Como visto na Figura 12, as células destacadas em vermelho serão os locais para isso. O restante das células adjacentes servirá para adicionar outras informações quanto a geometria da seção.

O cálculo utilizado para o valor da declividade entre as primeiras duas seções foi feito considerando a seguinte equação linear, já que ambos os pontos tinham bastante proximidade:

$$s_0 = \frac{E_{S2} - E_{S1}}{S_{S2} - S_{S1}} \quad (20)$$

Sendo:

- S_0 a declividade entre as duas seções;
- E_{S2} a elevação na seção 2;
- E_{S1} a elevação na seção 1;
- S_{S2} a estação ou distância horizontal na seção 2;
- S_{S1} a estação ou distância horizontal na seção 1.

Para a utilização do método do remanso pelo programa, algumas premissas e formulações foram consideradas. A primeira delas é que o programa, em sua rotina de cálculos, considera que o escoamento admite um fluxo gradualmente variado na estimativa. Isso permite contemplar as proposições de gerar um perfil de valores para constante de cavitação e um perfil de pressões controladas, ao tempo que se espera imprecisões em determinados pontos do escoamento dependendo dos parâmetros embutidos e da estrutura em si (FALVEY, 1990).

A índice de cavitação foi calculada pelo SpillwayPro seguindo da mesma Equação (18) apresentada anteriormente:

$$\sigma = \frac{E_0 - Z \cdot \rho \cdot g - P_V}{\rho \cdot V_0^2 / 2} = -(C_P)_{\min} \quad (18)$$

A velocidade foi determinada considerando uma integração da equação do movimento, considerando uma superfície livre entre o nível do reservatório e o ponto em análise.

Os pontos de controle que definem as seções da geometria foram introduzidos de duas formas. Primeiro, foram utilizados os pontos da estrutura repassados pela Eletrobrás-FURNAS para os cálculos no SpillwayPro. Estas compreendiam 17 seções definidas da crista até a concha de lançamento, no final da estrutura. Depois, verificou-se que haveria necessidade de adicionar mais pontos no software, o que tornou necessário verificar as equações que geraram a geometria da estrutura. Para isso, a partir do detalhamento em planta e corte da estrutura do vertedouro, foram encontradas as equações geradoras da geometria, e

com isso, possibilitou gerar mais pontos de controle no software, totalizando 40 seções analisadas, estas que foram introduzidas no programa.

As vazões utilizadas no estudo foram as seguintes:

- 1150 m³/s
- 1985 m³/s
- 2500 m³/s
- 3800 m³/s
- 4670 m³/s
- 8500 m³/s

Cada uma delas foi utilizada conforme os dados obtidos no modelo físico reduzido. Nos resultados apresentados no modelo, foram obtidos valores referentes a pressão, cota piezométrica e cota da superfície livre (lâmina d'água) a partir de 17 pontos de controle para cada uma das vazões, incluindo a vazão de 13000 m³/s. Entretanto, esta vazão não pode ser calculada corretamente no software por suas limitações e acabou sendo descartada da análise.

A partir destas formulações e dos valores definidos empiricamente, foram gerados os resultados das simulações para as vazões correspondentes.

4.3.2. DADOS DE SAÍDA

Ao adicionar os dados de entrada no software e computadas as rotinas do software, são gerados na guia Output Hydraulic os resultados da simulação conforme Figura 18. Como a análise deste trabalho condiz apenas aos parâmetros pressão média, velocidade média e índice de cavitação, serão estes os resultados aproveitados do programa. Contudo, na busca de uma melhor compreensão, será utilizado também dos resultados quanto a elevação da lâmina d'água, parâmetro intrinsecamente ligado aos três em análise e que auxiliará no cálculo da velocidade do modelo, sendo necessário utilizar também dos dados do SpillwayPro, afins de comparação.

Na Figura 18 é ilustrado, para exemplificar, os resultados obtidos para a vazão de 1150 m³/s, conforme os parâmetros embutidos no programa:

,

Figura 18 – Aba Output Geometry – SpillwayPro - Vazão de 1150 m³/s

COMPUTED FLOW PROFILE - HYDRAULIC PROPERTIES																	
AUTOR: GIANLUCA ARNOLD BORGES																	
Approximate Stilling Basin Lengths																	
Q	Y _c	Rugosity	Manning's n	EGL at Crest	Basin D _c	Basin Fr _c	Type I	Type II	Type III	Low Fr							
m ³ /s	m	m	-	m	m	-	m	m	m	m							
164,29	1,636	0,0010000	0,0141	754,66	7,17	7,24	44	30	19	14							
Station	Invert Elev.	Slope	Depth	Velocity	Water Surface Elev.	Piezo. Head	Energy Grade Line	Specific Energy	Profile	Normal Depth	Critical Depth	Fr	Fr _{r,ave}	Roll Wave Check	Friction Factor, f	Depth-Solver Error	
m	m	m/m	m	m/s	m	m	m	m	-	m	m	-	-	-	-	m	
11	0,000	750,80	0,027	1,636	8,42	752,50	0,238	754,66	3,86	S2	1,200	2,421	2,07	1,82	No	0,0142	0,0000
12	0,501	750,79	0,057	1,936	7,38	752,73	1,090	754,65	3,87	S2	0,944	2,538	1,69	1,55	No	0,0139	0,0000
13	1,372	750,71	0,113	1,985	7,31	752,68	1,213	754,65	3,93	S2	0,795	2,570	1,67	1,55	No	0,0139	0,0000
14	1,949	750,63	0,162	1,937	7,38	752,59	1,238	754,64	4,01	S2	0,674	2,591	1,69	1,59	No	0,0139	0,0000
15	2,577	750,52	0,209	1,890	7,56	752,45	1,210	754,64	4,12	S2	0,622	2,610	1,76	1,67	No	0,0140	0,0000
16	3,502	750,30	0,266	1,801	7,93	752,16	1,124	754,63	4,33	S2	0,578	2,633	1,89	1,82	No	0,0141	0,0000
17	4,502	750,00	0,328	1,701	8,40	751,79	1,025	754,62	4,62	S2	0,543	2,659	2,06	2,01	No	0,0142	0,0000
18	5,503	749,64	0,389	1,605	8,90	751,36	0,930	754,61	4,97	S2	0,518	2,687	2,24	2,23	No	0,0144	0,0000
19	6,503	749,22	0,449	1,515	9,43	750,88	0,842	754,60	5,37	S2	0,498	2,717	2,45	2,47	No	0,0145	0,0000
20	7,503	748,74	0,507	1,433	9,97	750,35	0,765	754,58	5,84	S2	0,482	2,747	2,66	2,73	No	0,0146	0,0000
21	8,500	748,21	0,566	1,356	10,53	749,76	0,690	754,56	6,35	S2	0,471	2,773	2,89	3,01	No	0,0148	0,0000
22	9,003	747,92	0,599	1,322	10,81	749,46	0,671	754,55	6,63	S2	0,463	2,797	3,00	3,17	No	0,0148	0,0000
23	10,004	747,30	0,647	1,255	11,39	748,79	0,609	754,52	7,22	S2	0,455	2,824	3,25	3,47	No	0,0150	0,0000
24	11,003	746,63	0,702	1,194	11,97	748,08	0,560	754,49	7,87	S2	0,447	2,855	3,50	3,80	No	0,0151	0,0000
25	12,003	745,90	0,756	1,138	12,55	747,32	0,517	754,46	8,56	S2	0,440	2,887	3,76	4,14	No	0,0152	0,0000
26	13,004	745,11	0,810	1,087	13,14	746,51	0,480	754,41	9,30	S2	0,434	2,919	4,02	4,51	No	0,0153	0,0000
27	14,097	744,20	0,852	1,053	13,57	745,58	0,751	754,36	10,16	S2	0,430	3,004	4,22	4,84	No	0,0154	0,0000
28	20,500	738,65	0,866	0,847	16,87	739,77	0,640	753,88	15,23	S2	0,429	3,021	5,85	6,75	No	0,0161	-0,0001
29	20,583	738,58	0,814	0,871	16,40	739,70	1,498	753,87	15,29	S2	0,434	3,129	5,61	6,51	No	0,0160	0,0000
30	22,824	736,87	0,667	0,833	17,16	737,88	1,669	753,67	16,79	S2	0,452	3,061	6,00	6,73	No	0,0161	0,0000
31	25,308	735,45	0,491	0,806	17,73	736,35	1,807	753,43	17,98	S2	0,486	2,982	6,31	6,81	No	0,0162	0,0000
32	28,057	734,33	0,333	0,789	18,11	735,16	1,921	753,17	18,84	S2	0,541	2,928	6,51	6,84	No	0,0163	-0,0001
33	31,000	733,57	0,219	0,780	18,3	734,371	1,985	752,891	19,32	S2	0,613	2,90	6,62	6,86	No	0,0163	0,0000

(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Para a análise comparativa dos parâmetros, cabe citar como foi definida a concepção de posição inicial dos dados. No SpillwayPro, para uma correta depuração dos dados, é necessário que as seções introduzidas comecem a partir da crista do vertedouro de barragem, tornando-o assim o ponto inicial do eixo x. Em contrapartida, dentre os valores enviados pela Eletrobras-FURNAS, o início do eixo x foi definido a partir do início da parábola de geração do vertedouro. Na busca de preservar a coesão dos dados, foi feita a conversão para que não houvesse discrepância em questão da posição inicial, usando como base do eixo x a posição conforme definida no software.

5. ANÁLISES DOS RESULTADOS

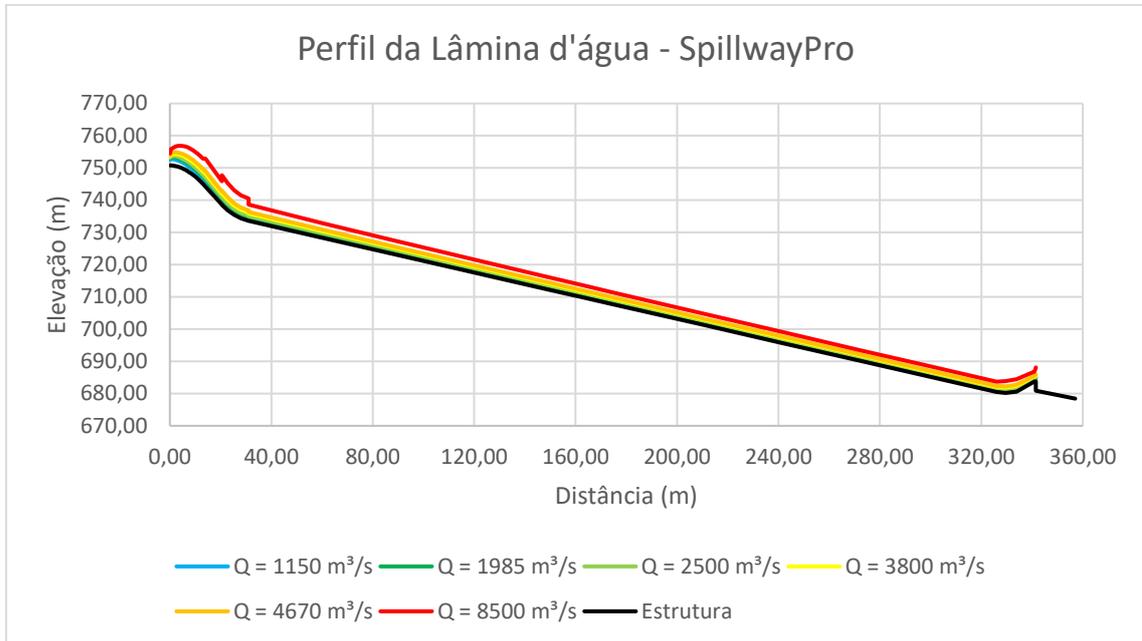
Neste capítulo será descrito como foi feita a análise dos resultados obtidos no software SpillwayPro, correlacionados aos parâmetros de pressão, velocidade média e índice de cavitação. Além disso, para auxiliar na comparação dos dados, serão utilizados dos limites expressos na bibliografia, estes que apontam desgaste por cavitação no vertedouro quando extrapolados, em conjunto dos resultados encontrados no modelo físico, enviados pela Eletrobras-FURNAS.

5.1. LÂMINA D'ÁGUA MÉDIA

Entende-se que apresentar inicialmente o perfil da lâmina d'água é importante, por ser um parâmetro que servirá como variável do cálculo das velocidades e índices de cavitação do modelo, assim como apresentar de uma forma mais clara como o escoamento se comporta sobre a estrutura em cada uma das duas abordagens.

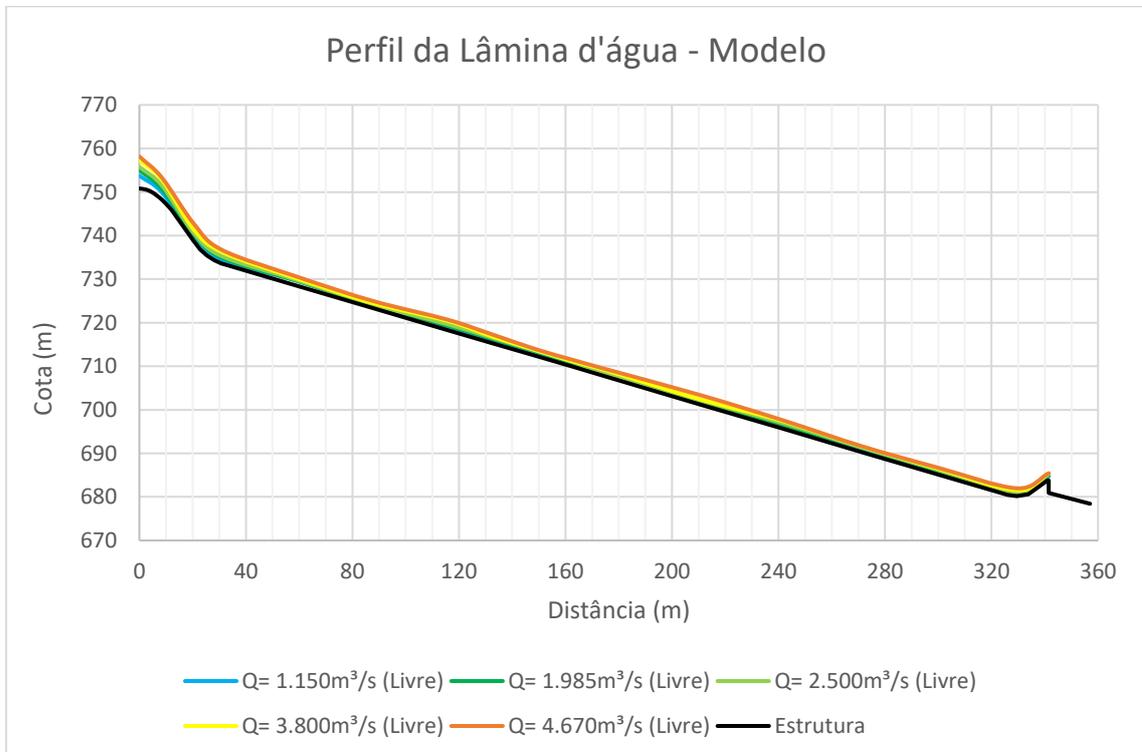
Na Figura 19 e Figura 20 a seguir, estão os resultados obtidos para a lâmina d'água, obtidos conforme os dados recebidos da Eletrobras-FURNAS para o modelo físico reduzido, e os determinados analiticamente pelo SpillwayPro conforme simulações.

Figura 19 - Lâmina d'água conforme dados obtido no software SpillwayPro



(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Figura 20 - Lâmina d'água conforme dados obtidos nos dados enviados pela Eletrobras-FURNAS



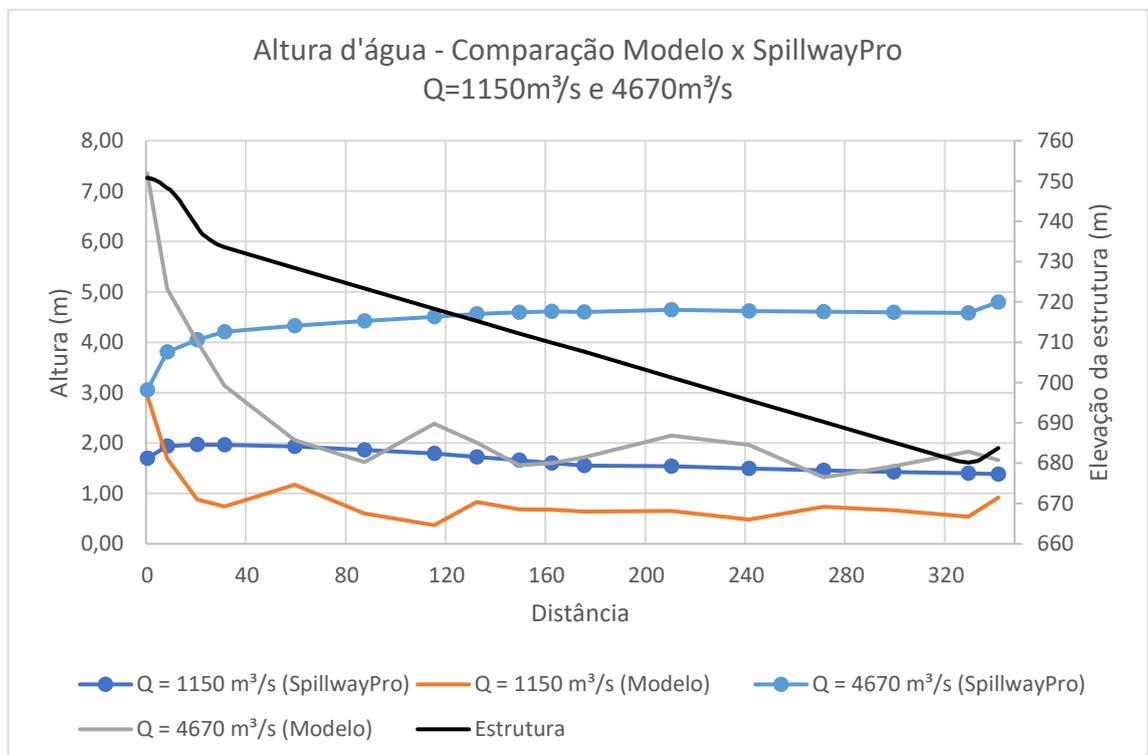
(Fonte: elaborado pelo autor)

Verificou-se que o comportamento das lâminas ao longo do vertedouro se manteve parcialmente semelhante: verificou-se certas divergências nas regiões com curva, principalmente na zona inicial, mas convergente nas regiões retas a partir da posição aproximada de 20,0 metros.

Para a vazão de $Q=8500\text{m}^3/\text{s}$, não foram disponibilizados dados para a utilização nos gráficos, entretanto, o restante dos dados foi bastante representativo de forma que não houve uma discrepância relevante entre as vazões apresentadas no software e no modelo para vazões menores. Ao comparar os dados, entende-se que os resultados obtidos na Figura 20 foram bastante relevantes para reiterar que o comportamento das lâminas apresentado pelo SpillwayPro foi calculado corretamente e com poucas divergências, justificadas pela alta curvatura, no software.

Para tornar mais claro as diferenças de lâminas d'água, será apresentado na Figura 21, para as vazões de $1150\text{m}^3/\text{s}$ e $4670\text{m}^3/\text{s}$, os valores de altura de água ao longo do perfil geométrico avaliado. Os valores para gerar o gráfico foram calculados a partir da diferença entre as cotas de elevação da lâmina d'água com as cotas da estrutura:

Figura 21 - Comparação das alturas de água ao longo da estrutura



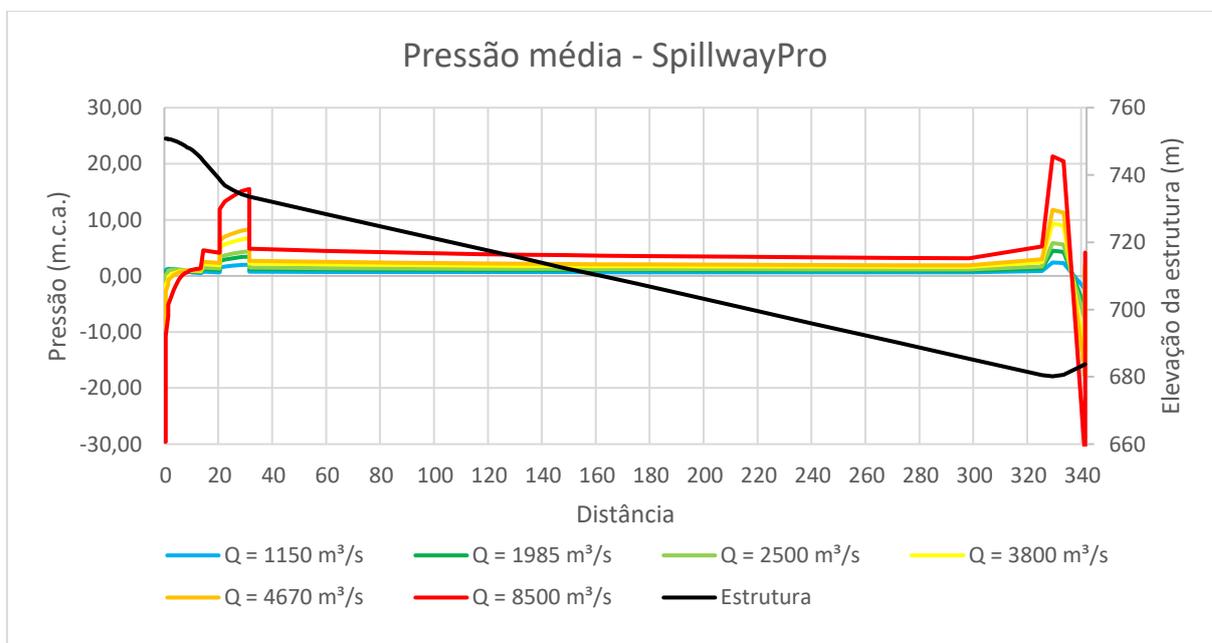
(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Nesta figura, tonifica-se as diferenças entre as duas abordagens. No início, nota-se que as diferenças geradas entre a elevação da lâmina d'água com a estrutura, que chamamos de altura d'água (Figura 21), são inversamente proporcionais na região da crista do vertedouro: enquanto que no modelo os valores tendem a decrescer com uma alta altura inicial, os valores encontrados no SpillwayPro crescem exponencialmente na crista e seguem de um comportamento crescente ao longo da estrutura. Como para vazões mais baixas, os valores se assemelham, isso reitera a veracidade entre os dados do modelo com o software, diante da proporcionalidade entre eles. Entretanto, para vazões mais altas, deve-se dar maior atenção pois isso reduz significativamente a relação entre as abordagens, seja do modelo ou do software, do restante dos resultados a serem apresentados.

5.2. PRESSÃO MÉDIA

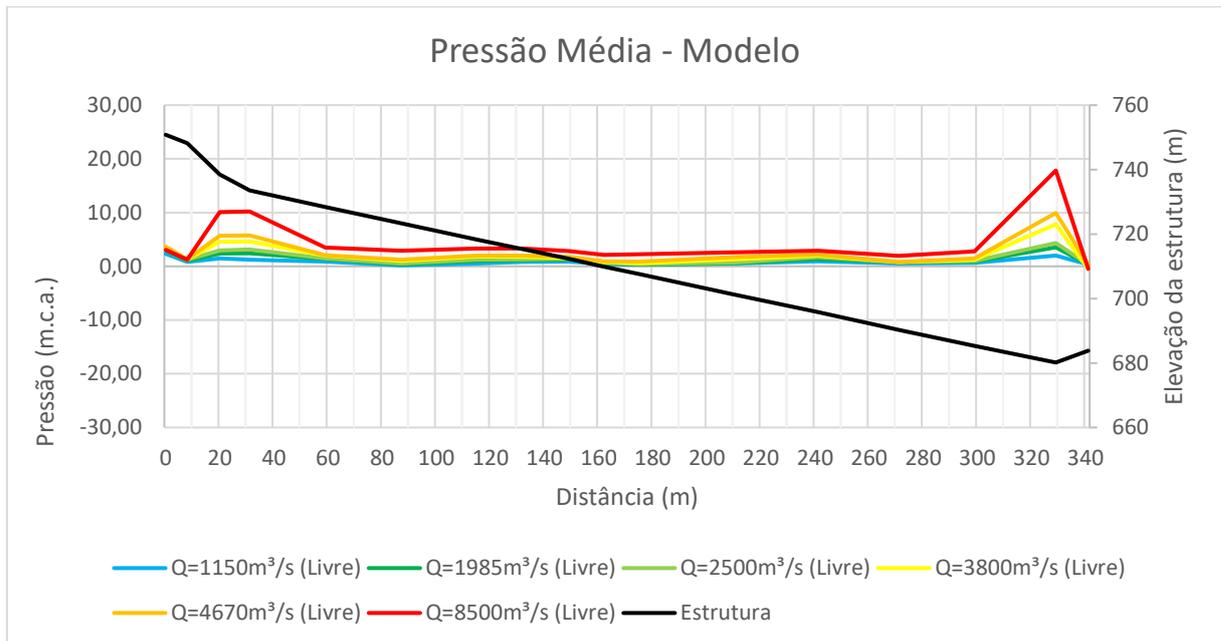
Tendo em posse os dados da carga piezométrica e das pressões nas seções definidas para o modelo e para o software, foi possível gerar os gráficos relativos à pressão média da estrutura das duas abordagens, representados pelas Figura 22 e Figura 23:

Figura 22 – Pressões conforme dados obtidos no software SpillwayPro



(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Figura 23 - Pressões conforme dados obtidos nos dados enviados pela Eletrobras-FURNAS

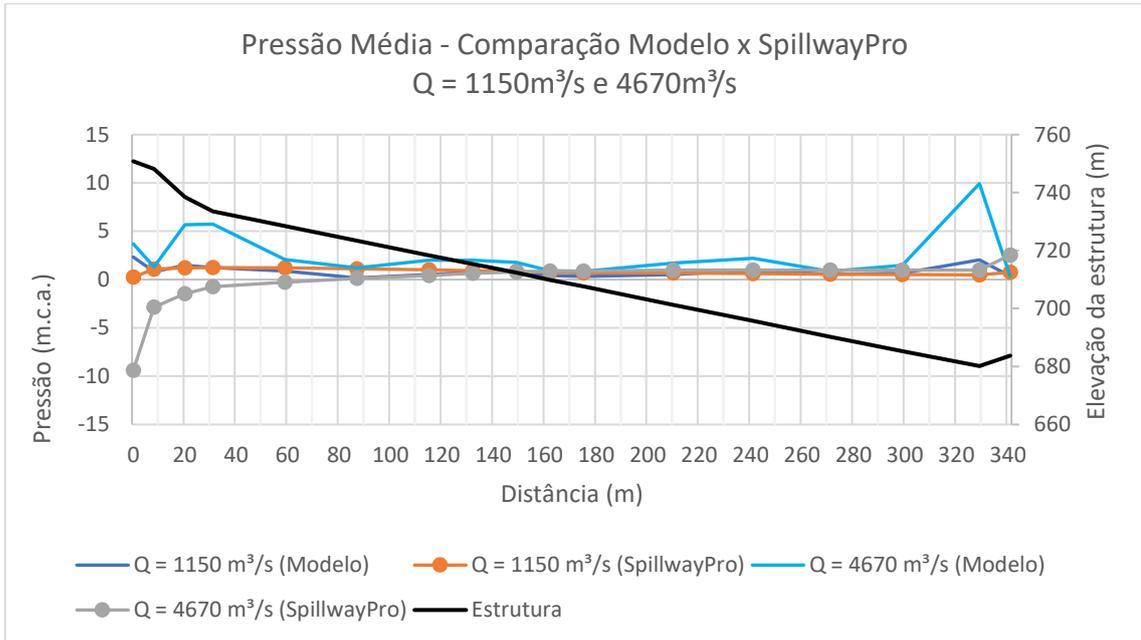


(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

A partir dos dados de pressão média ao longo das seções de análise da estrutura, foi possível detectar uma relativa divergência nas extremidades do gráfico da Figura 22. Esta divergência acaba se tornando mais intensa nos dois extremos da estrutura: no início da crista e na concha de lançamento do vertedouro. Enquanto que no SpillwayPro foram encontrados subpressões relativamente altas, no início e no fim da estrutura, não foi visto quando verificado no modelo. Quanto ao restante da estrutura, ambos gráficos mantiveram o mesmo comportamento: o foco das sobrepressões acabou sendo o mesmo, na região de posição 20,5 a 31,0m, assim como na posição de 329,5m. Entende-se que houve limitações na depuração dos dados do software nas extremidades, mas uma certa coerência no restante da estrutura.

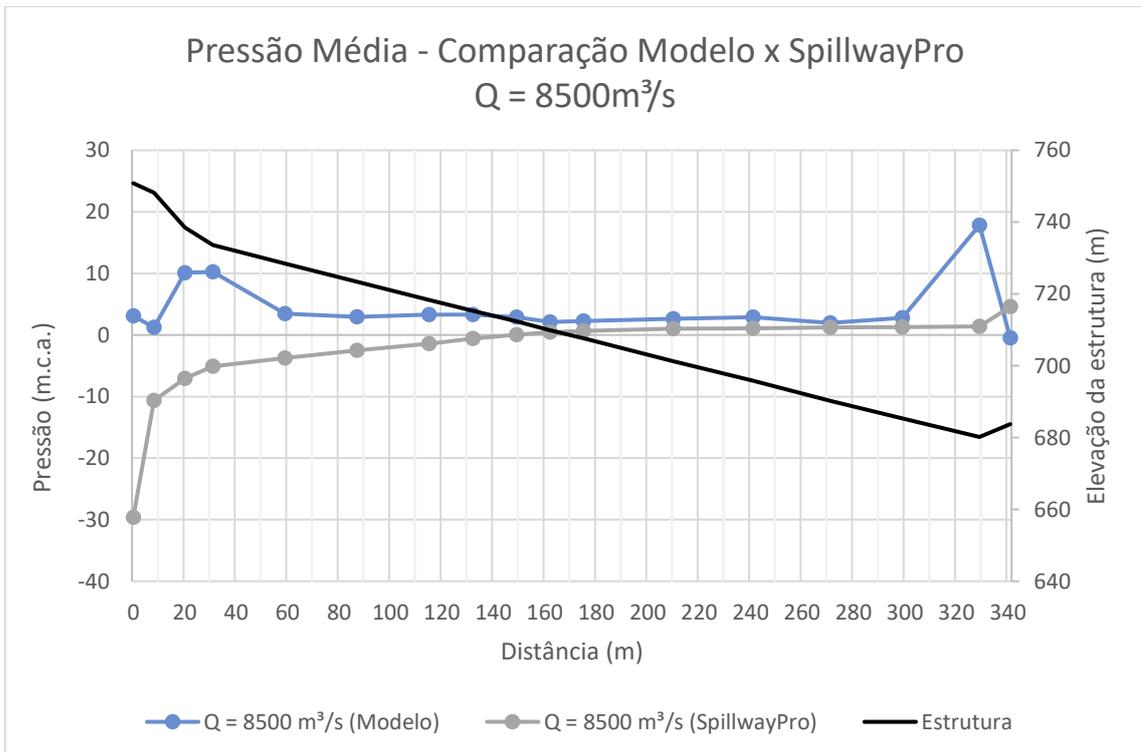
Para as Figura 24 e Figura 25, são apresentados os resultados para a menor ($Q = 1150 \text{ m}^3/\text{s}$) e para as duas maiores vazões utilizadas no estudo ($Q = 4670 \text{ m}^3/\text{s}$ e $Q = 8500 \text{ m}^3/\text{s}$). Diferente da situação da lâmina d'água, foram obtidos dados para o parâmetro pressão na vazão de $Q = 8500 \text{ m}^3/\text{s}$, estes que serão apresentados separadamente na Figura 25, afim de apontar as diferenças neste caso extremo:

Figura 24 - Comparação entre as pressões médias para duas vazões ao longo da estrutura



(Fonte: elaborado pelo autor, 2024)

Figura 25 - Comparação entre as pressões médias para vazão de $Q=8500\text{m}^3/\text{s}$ ao longo da estrutura



(Fonte: elaborado pelo autor)

A disparidade significativa entre os dados apresentados pelos dois gráficos das Figura 24 e Figura 25 em relação à pressão, conforme o aumento da vazão, é um ponto de análise crucial. Essa diferença pode indicar variações significativas nas condições de aplicabilidade

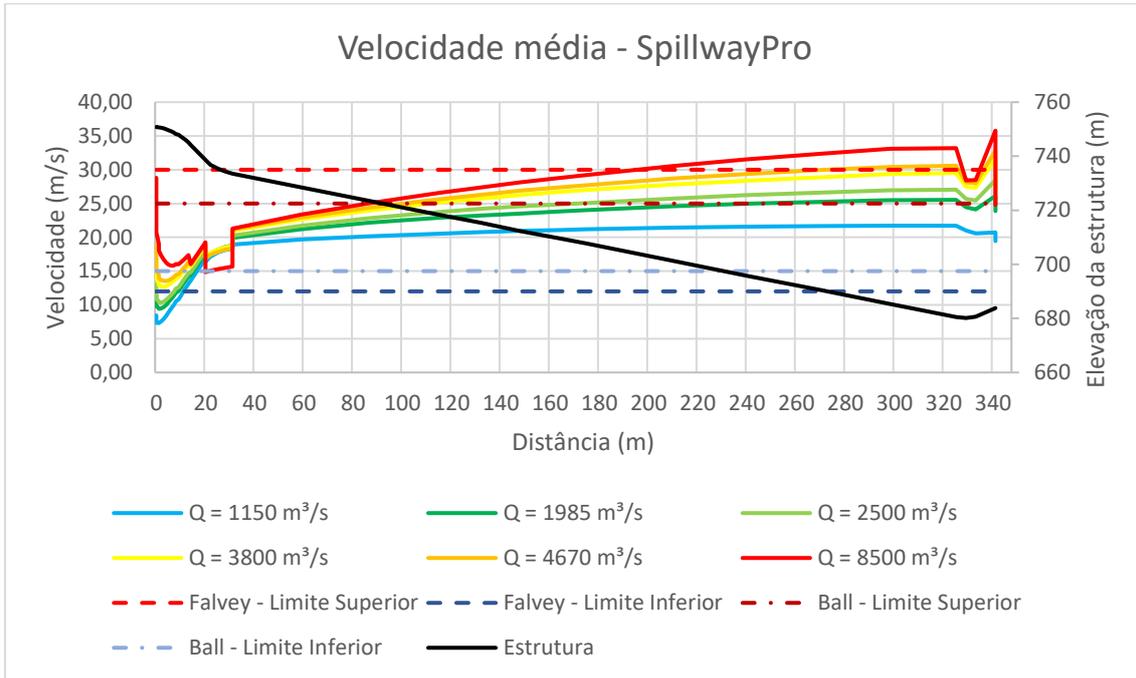
do software SpillwayPro para o parâmetro nas regiões limitantes das extremidades. Uma possível explicação para essa disparidade pode estar relacionada à imprecisão do programa na medição de vazões maiores, assim como um possível erro na análise da geometria do vertedouro de barragem nas regiões das curvaturas do perfil.

5.3. VELOCIDADE MÉDIA

Para uma análise abrangente do parâmetro hidráulico velocidade, procedeu-se a um comparativo entre os resultados obtidos por meio das simulações realizadas no software SpillwayPro (Figura 26) e os dados calculados a partir da lâmina d'água obtida pela Eletrobras-FURNAS (Figura 27). Essa comparação foi enriquecida pela referência aos limites admissíveis estabelecidos por Falvey (1990), Ball (1959) e Ball (1976) para a velocidade média na estrutura em questão.

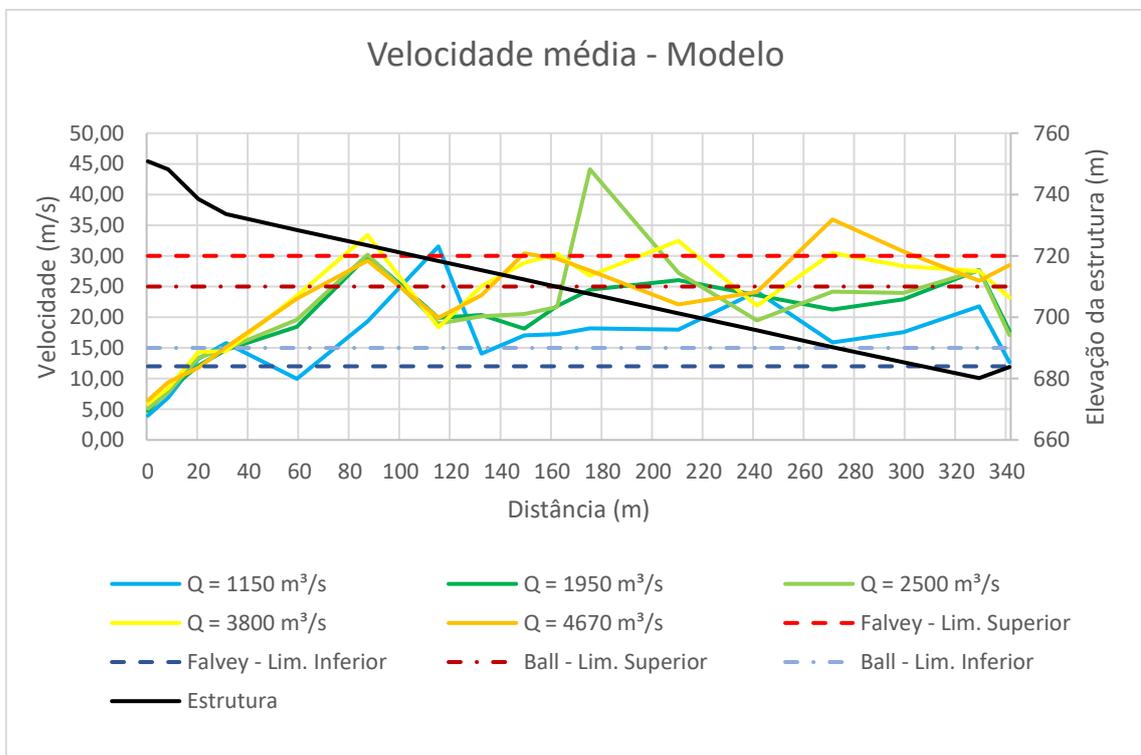
Os limites, como apresentados na revisão bibliográfica, demonstram-se prejudiciais quanto ultrapassados com velocidades superiores. Falvey (1990) traz que a partir de 10 m/s deve-se dar mais atenção, enquanto que a partir de 30-35 m/s, gera-se um alto risco de ocorrer cavitação sobre a estrutura. Ball (1959) remete de forma semelhante que a partir de 15 m/s deve-se observar melhor a estrutura e que a partir de 25 m/s tonifica-se o risco de cavitação. Esses valores, por consequência foram apresentados nos gráficos das Figura 26, Figura 27 e Figura 28 para facilitar a compreensão dos riscos de se ter altas velocidades:

Figura 26 – Velocidades conforme dados obtidos no software SpillwayPro



(Fonte: Elaborado pelo autor)

Figura 27 - Velocidades calculada conforme dados obtidos pela Eletrobras-FURNAS



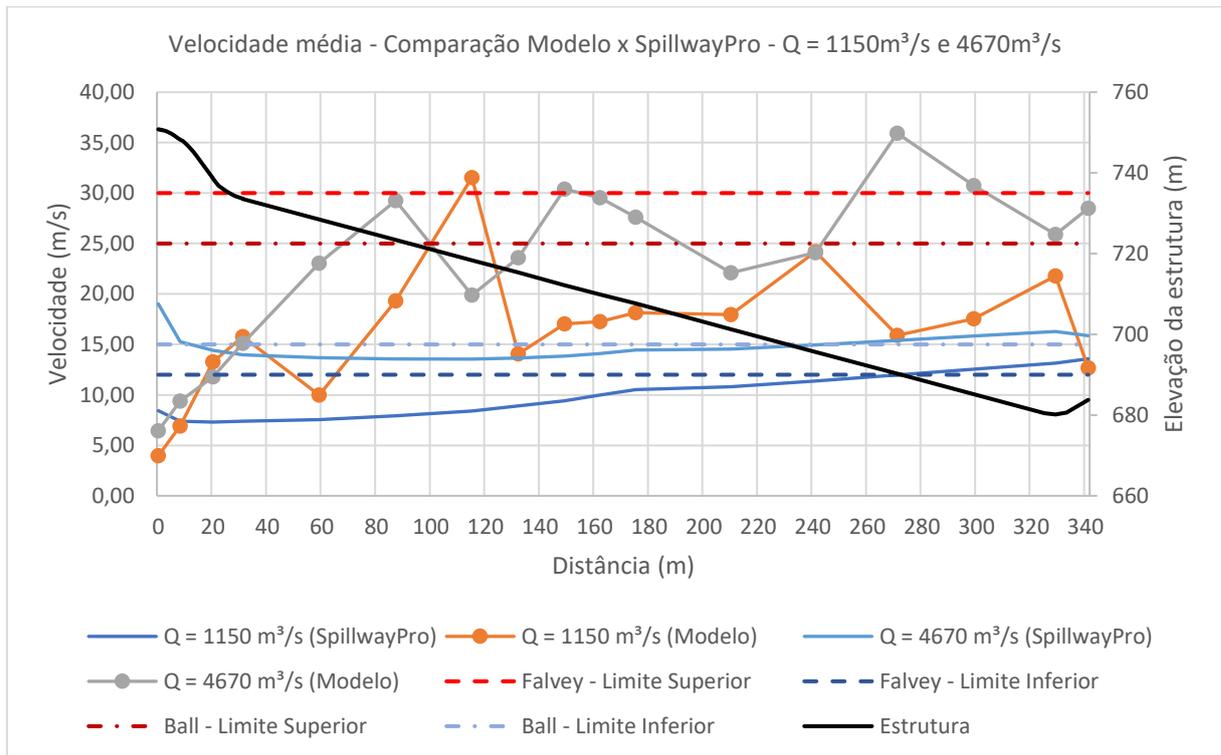
(Fonte: Elaborado pelo autor)

Os resultados obtidos para a velocidade apresentaram uma disparidade significativamente maior quanto ao comportamento, se comparado aos parâmetros lâmina d'água e pressão. Diferente dos outros parâmetros analisados, os dados de velocidade revelaram uma maior variabilidade e diferença entre os resultados obtidos no software e no modelo físico. Enquanto os dados gerados pelo software mostraram uma consistência mais próxima da realidade, dentre os limites estipulados por Falvey (1990) e Ball (1959), os valores obtidos no modelo físico foram consideravelmente mais divergentes e flutuantes.

Ao analisar a velocidade na Figura 26, exceto na vazão de 1150 m³/s, todas as vazões ultrapassaram o limite de 25 m/s de Ball (1959). Ao considerar o limite de Falvey (1990), apenas a partir da vazão de 4670 m³/s que se encontraram valores maiores que 30 m/s como indicado. E considerando a velocidade na Figura 27, todos valores, de forma arbitrária e sem um comportamento constante, ultrapassaram os dois limites abordados nas bibliografias.

Essa discrepância pode ser observada claramente na Figura 28, evidenciando a inconsistência dos resultados obtidos no modelo físico em comparação com os dados gerados pelo software. Semelhante a situação no parâmetro lâmina d'água, como as velocidades médias foram calculadas conforme as alturas de água sobre a estrutura, não foi possível compará-las na vazão de $Q = 8500\text{m}^3/\text{s}$. Essa disparidade entre os resultados destaca a importância de uma análise minuciosa e crítica dos métodos de simulação, bem como da validação dos resultados experimentais:

Figura 28 - Comparação entre as velocidades médias para duas vazões ao longo da estrutura



(Fonte: Elaborado pelo autor)

Ao analisar os resultados obtidos no SpillwayPro, diversas observações pertinentes podem ser feitas. Na zona de transição, conforme ilustrado na Figura 26, para uma vazão de 8500m³/s próximo à posição de 20,50m, é claramente visível uma mudança abrupta na velocidade do fluxo. Essa mudança foi identificada como um erro pelo programa, indicando a possibilidade de uma curvatura excessiva que poderia comprometer a correta aplicação das equações de fluxo gradualmente variável durante a depuração dos resultados.

Ao examinar os dados indicados como limites estabelecidos na literatura, observa-se que as vazões apresentaram comportamentos consistentes com as previsões de Falvey (1990) e Ball (1959), porém excederam esses limites em alguns casos. Notavelmente, as vazões a partir de 3800m³/s ultrapassaram o limite superior indicado por Falvey (1990) de $V_{máx} = 30$ m/s, especialmente na região próxima à calha do vertedouro da barragem. Apenas as vazões de 1150m³/s e 1985m³/s permaneceram abaixo do limite estipulado por Ball (1959). Essas análises destacam a importância de se prestar atenção aos potenciais danos por cavitação nessas áreas, com especial ênfase na região final, além de ressaltar a necessidade de cautela e análise aprofundada ao interpretar os resultados e ao considerar os potenciais impactos na operação e na integridade da estrutura.

Apesar da dispersão dos valores encontrados no modelo, é bom observar que, em sua maioria, esses valores permanecem dentro dos limites estabelecidos pelos parâmetros de referência. Embora haja variações significativas em algumas medições, a análise geral revela que as vazões se mantêm coerentes com as expectativas delineadas por Falvey (1990) e Ball (1959). É importante notar que, embora esses resultados possam ser considerados dispersos, eles ainda se alinham com as previsões teóricas e os padrões de desempenho aceitáveis para a estrutura em questão, além de oferecer uma representação razoável do comportamento hidráulico da estrutura.

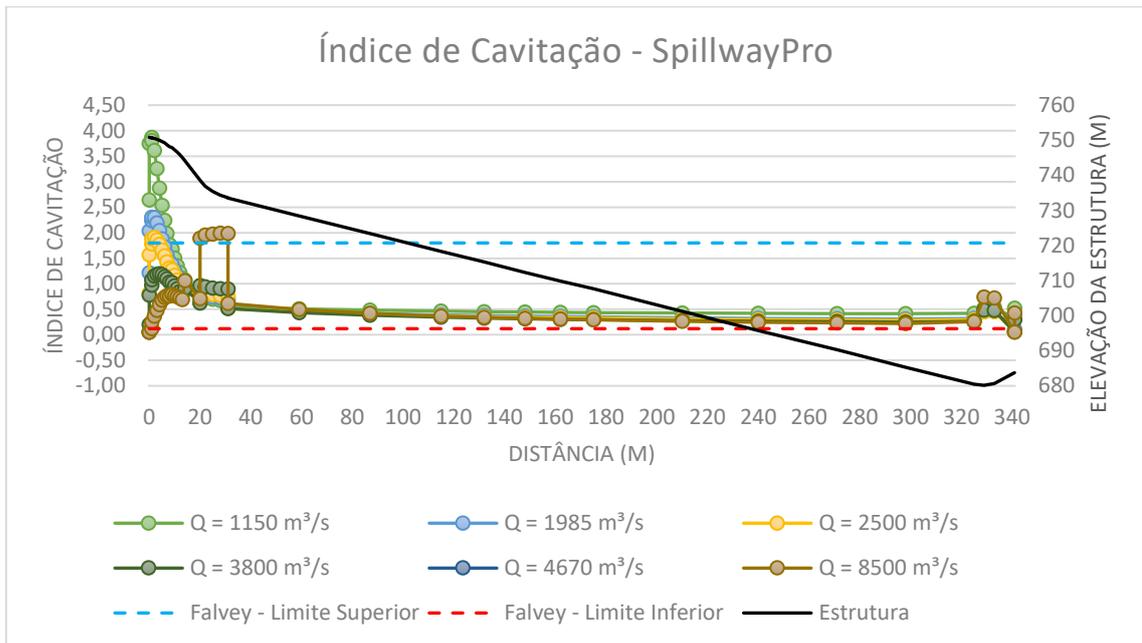
5.4. ÍNDICE DE CAVITAÇÃO

Quanto ao parâmetro índice de cavitação, o comparativo será feito com base nos índices apontados na revisão bibliográfica, recomendados por Falvey (1990).

Falvey (1990) aponta que para índices maiores que 1,8, não será necessária nenhuma proteção contra erosão. Entretanto, conforme verificam-se valores menor que 1,8, certas exigências devem ser tomadas e que, ao ultrapassar o valor de 0,12, outra configuração de perfil deve ser tomada.

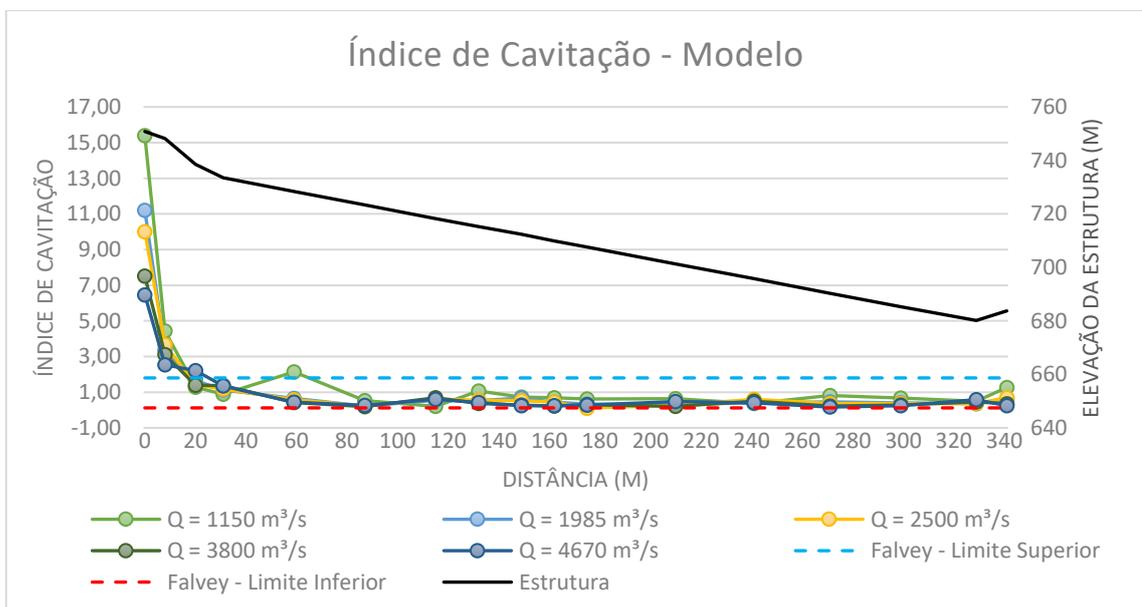
Conforme as Figura 29 e Figura 30, percebe-se que a região onde obteve-se tanto maiores como menores valores foi na zona da crista do vertedouro, sendo ultrapassados os limites propostos por Falvey (1990) quando em condições hidrológicas iguais ou maiores vazões de 8500m³/s. Para vazão de 4670m³/s, foram encontrados valores menores que 0,12 para o índice de cavitação, mas por terem sido casos pontuais, reitera-se apenas atenção nas regiões da crista e da jusante do vertedouro.

Figura 29 - Índice de Cavitação conforme dados obtidos no SpillwayPro



(Fonte: Elaborado pelo autor)

Figura 30 - Índice de Cavitação conforme dados no modelo



(Fonte: Elaborado pelo autor)

Quanto ao restante da estrutura, o comportamento segue proporcional e esperado com os encontrados para velocidade. Conforme a vazão aumentava, os valores para o índice de cavitação se tornaram menores, estabilizando em torno de 0,5 após a primeira inflexão

(posição de 31,50m, decrescente na região declive e com um aumento na região da calha até diminuir no ponto final da calha.

Mesmo ao obter valores razoáveis como indicado pro Falvey (1990), acima de 0,12, é importante trazer que as regiões de ocorrência de menores índices de cavitação são uma preocupação para o vertedouro. Em zonas como nas proximidades a ogiva, pensando num possível desprendimento do escoamento da estrutura, é onde mais se favorecesse subpressões e, por consequência, a possível implosão de bolhas que irão gerar o desgaste da estrutura.

Não obstante, baixos índices de cavitação interligados a velocidades altas também devem ser levados em consideração. Na zona próxima ao dissipador de energia tem-se essa situação da qual, para maiores vazões, o potencial de danos se torna maior e a possibilidade de ocorrer cavitação como consequência.

A partir dos dados de velocidade e pressão obtidos no modelo, foi possível calcular os índices de cavitação através da equação (18). Esses dados apresentaram comportamentos bastante semelhantes aos do software de simulação, indicando uma consistência relativa entre as duas abordagens. No entanto, uma observação significativa foi que os índices de cavitação calculados se mantiveram consistentemente acima, porém próximos do limite inferior de 0,12 estipulado na bibliografia consultada. Isso ressalta a importância de se dedicar uma atenção especial aos potenciais riscos de danos por cavitação nessas condições, destacando a necessidade de considerar medidas preventivas adequadas para garantir a integridade e a operacionalidade da estrutura hidráulica em questão.

6. CONCLUSÕES

Devido à ocorrência intrínseca do fenômeno da cavitação e aos danos cumulativos nas superfícies hidráulicas devido ao fluxo, torna-se imprescindível a utilização de ferramentas preditivas para o controle eficaz e econômico de estruturas como vertedouro. A utilização do software SpillwayPro permitiu identificar o comportamento do escoamento nas vazões em estudo para a UHE FURNAS, comparar com dados obtidos em modelo, com referenciais apontados na literatura e, por consequência, predizer zonas do vertedouro com potencial de ocorrer danos ao longo do tempo.

Com a estimativa dos parâmetros hidráulicos pelo software, apresentou-se resultados coerentes com as configurações geométricas da estrutura, mas que não coincidiam com os dados do modelo. Ao compará-las, percebeu-se divergências entre os resultados, o que tornou difícil avaliar o comportamento dos resultados descritos pelo software, principalmente quanto ao parâmetro velocidade.

As zonas de dispersão dos resultados tiveram sinalizações apontadas pelo próprio SpillwayPro. Os segmentos com curvatura como na crista (posição 0,00m), na transição entre a curvatura com o trecho reto (posição 20,50) e nas proximidades a jusante da estrutura (posição 329,50m a 341,50m), foram os mais discrepantes. Entretanto, avisos de que poderia haver curvatura acentuada nessas regiões e que as equações de fluxo gradualmente variado não seriam suficientes para uma correta depuração foram dados ao realizar a simulação.

Mesmo com as dispersões ao longo dos resultados, ainda foi possível determinar as zonas com maior propensão a danos por cavitação. Os limites apontados pela literatura auxiliaram na condução dos resultados de forma que, quando ultrapassados, apontariam quais recomendações deveriam ser seguidas quanto a região da estrutura. Como visto, grande parte das velocidades médias mantivera-se entre ou abaixo dos limites críticos estipulados por Falvey (1990) e Ball (1959) e, mesmo quando ultrapassadas, ainda se mantinham próximas. As regiões apontadas como possível zona de cavitação pelas Figura 29 e Figura 30 coincidiram, sendo elas a crista e na concha a jusante, próxima ao dissipador de energia, conforme os valores encontrados para índice de cavitação das duas fontes, ambos menores que 0,12.

É preciso considerar que não foi possível apresentar dados referentes a vazão máxima vertida ($Q_{\text{máx}} = 13000 \text{ m}^3/\text{s}$). Ao simular no software, por limitações na spreadsheet, os valores não conseguiam ser computados corretamente e depuravam antes do previsto. Com

isso, reitera-se atenção nas regiões com potencial de danos por cavitação justamente por não terem sido apresentadas curvas para vazão máxima vertente, necessitando que elas sejam monitoradas e, se necessário, prever dispositivos ou manutenções que possam prolongar a vida útil da estrutura. Ademais, verificações ao longo da estrutura devem ser observadas pois sejam irregularidades pontuais, como rugosidades divergentes por mal acabamento ou fissuras, mesmo em vazões menores, podem acabar sendo prejudiciais para o bom funcionamento do vertedouro de barragem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABECASIS, F. M. M. **Soleiras descarregadoras. Alguns problemas especiais.** Dissertação de mestrado apresentada ao LNEC. LNEC, Memória n° 175. 110p. Lisboa, 1961.
- ABREU, A. S. **Análise experimental em modelo físico de estruturas hidráulicas de remoção de sedimentos em barragens: Descarregadores de fundo.** Pelotas, Brasil, 2019.
- ABREU, A. S. **Fenômeno de cavitação em estruturas hidráulicas de concreto.** Qualificação (Doutorado). Programa Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, UFRGS, Porto Alegre, 2022.
- ARAUZ, I. J. **Vertedor de superfície e escoamento sob comportas.** Dissertação de mestrado – São Paulo. USP, 2005.
- AZEVEDO NETTO, J. M.; FERNÁNDEZ, M. F. **Manual de Hidráulica.** 9ed. São Paulo: Bucher. 2015.
- BALL, J. W. **Cavitation from surface irregularities in high velocity.** Journal of the Hydraulic Division, ASCE. No. HY9, Setember, 1976. pp. 12435-1297.
- BALL, J. W. **Cavitation and vibration for a cylinder gate designed for high heads.** In: Eighth Congress of the International Association, Hydraulic Research, 1959, Montreal, Canada. 24-29 p.
- BAPTISTA, M. B.; LARA, M. **Fundamentos de Engenharia Hidráulica.** 3ed. Belo Horizonte: UFMG. 480p. 2010.
- CARVALHO, E. **Grandes Vertedouros Brasileiros.** In: CBDB. O vertedouro de Porto Colômbia - Desempenho e recuperação da bacia de dissipação. 1ª ed. 2010. p. 129 – 138.
- CETESB. **Drenagem Urbana: Manual de Projeto.** 3ª Ed. São Paulo: Cetesb, 1986.
- CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics.** New York: McGraw-Hill, 1959.
- COLGATE, D. **Cavitation damage in hydraulic structures.** Wear of Materials 1977. ASME, New York, N. Y. 1977, 433-438, 1977.
- CREAGER, W. P.; JUSTIN, J. D. **Hydroelectric Handbook.** 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1950.
- ELETROBRÁS FURNAS. Relatório de Produto - P&D ANEEL N° 00394-1706/2017 - **Concepção e Projeto Dos Modelos/Estruturas/Dispositivos de Ensaio (R4.2) - Furnas,**

elaborado pelo Departamento de Segurança de Barragens e Tecnologia - Divisão de Tecnologia em Engenharia Civil e Hidráulica. Rio de Janeiro, 2022.

FALVEY, H. T. **Cavitation in chutes and spillways**. Denver: US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 1990.

FALVEY, H. T. **Predicting cavitation in tunnel spillways**. In: Water Power & Dam Construct., v. 34, n. 8, p. 13-15, 1982.

INOZEMTSEV, Yu. P., Rozanov, N. P., Shal'nev, K. K., Pshenisynn, P. A. and Sakhrovv, V. I., **Cavitation-Erosion Resistance of Hydraulic Concretes based on Cement and Polymer Cements**. Doklady MAGI (XI kongress). No. 1-48, Leningrad, 1965.

KNAPP, R. T., DAILY, J. W., HAMMITT, F. G.; **Cavitation**. McGraw Hill, 1970. 578 pp.

LAURENT, O. **Time, 2017**. Rompimento por cavitação na barragem de Oroville, Califórnia. Disponível em: < <https://time.com/4674934/oroville-dam-photos/>>. Acesso em: 02 jan. 2024.

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

MACINTYRE, A. J. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997. 206 - 207 p.

OLIVEIRA, M. T. **Análise das pressões médias ao longo do sistema extravasor da UHE Foz do Chapecó**. Porto Alegre, Brasil, 2023.

PORTO. R. M.; **Hidráulica Básica**. 4ª. ed. São Carlos, EESC-USP, 2006.

ROCHA, H. **Saff Engenharia, 2020**. Vertedouro de Oroville, Califórnia. Disponível em: <https://saffengenharia.com.br/o-problema-da-cavitacao-em-extravaso-res-de-barragens/>.

Acesso em: 01 jan. 2024.

ŞENTÜRK. F.; **Hydraulics of Dams and Reservoirs**. Water Resources Publication. Highlands Ranch, Colorado, 1994

TULLIS, J. P. **Cavitação em sistemas hidráulicos**. Intercâmbio Internacional sobre Transientes Hidráulicos e Cavitação, 1982.

USBR. **Design of Small Dams**. 2ed. US Department of The Interior, Bureau of Reclamation, US Government Printing Office. Washington, DC, 1973.

WHITE, F. M.; **Mecânica dos Fluidos**. Porto Alegre: Editora Bookman Companhia Editora Ltda, 2011; 6º Ed. 880 p.