

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
CURSO DE ENGENHARIA HÍDRICA**

**LUÍSA LÜDTKE LAUFFER**

**Uso de simulação numérica para avaliação de grandezas associadas a  
patologias no concreto de vertedouros salto esqui**

Porto Alegre  
Novembro de 2021

**LUÍSA LÜDTKE LAUFFER**

**Uso de simulação numérica para avaliação de grandezas associadas a patologias no concreto de vertedouros salto esqui**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para obtenção do título de engenheira hídrica.

**Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto**

Porto Alegre  
Novembro de 2021

### CIP - Catalogação na Publicação

Lauffer, Luísa Lüdtke

Uso de simulação numérica para avaliação de grandezas associadas a patologias no concreto de vertedouros salto esqui / Luísa Lüdtke Lauffer. -- 2021.

69 f.

Orientadora: Daniela Guzzon Sanagiotto.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia Hídrica, Porto Alegre, BR-RS, 2021.

1. Vertedouro salto esqui. 2. Simulação numérica. 3. Ansys. I. Sanagiotto, Daniela Guzzon, orient. II. Título.

*Folha de Aprovação*

Luísa Lüdtke Lauffer

Uso de simulação numérica para avaliação de grandezas associadas a patologias no concreto de vertedouros salto esqui

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em 19/11/2021 pela Comissão Avaliadora constituída por:

Banca Examinadora:

.....

Prof. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto – Orientadora

.....

Guilherme Fuhrmeister Vargas - Doutorando no PPGRHSA

.....

Prof. Dr. Maurício Dai Prá – DOH – Departamento de Obras Hidráulicas

## RESUMO

Vertedouros são estruturas hidráulicas que têm por objetivo garantir a segurança de uma barragem, permitindo a passagem do excesso de água para jusante. Os vertedouros estão sujeitos a manifestações patológicas nas estruturas de concreto devido a passagem de fluxos em altas velocidades. Este estudo teve como objetivo avaliar a utilização de simulações numéricas do escoamento para analisar grandezas hidráulicas associadas a manifestações patológicas no concreto da calha de vertedouros salto esquí. Foi estudado o vertedouro da UHE Furnas, que possui largura total de 80,5 m. As simulações foram feitas em escala de protótipo para uma geometria com juntas de concretagem distribuídas ao longo da calha e uma geometria sem juntas. Foram avaliadas vazões iguais a 2089 m<sup>3</sup>/s, 1684 m<sup>3</sup>/s e 779 m<sup>3</sup>/s, que representam vazões de vertimento observadas na estrutura real. As simulações foram feitas no software Ansys – CFX, que utiliza o método dos volumes finitos para resolver as equações do escoamento. A turbulência foi modelada utilizando a decomposição de Reynolds (RANS - *Reynolds Averaged Navier-Stokes*). O modelo de turbulência utilizado foi o k-ε. Para a discretização do domínio geométrico, foi definida uma malha não estruturada, tetraédrica, com aproximadamente 10<sup>5</sup> elementos na geometria sem juntas de concretagem e 10<sup>6</sup> elementos na geometria com juntas de concretagem. Para as duas estruturas analisadas, foram obtidos resultados para cinco pontos distribuídos ao longo da calha do vertedouro. Os perfis de velocidade obtidos numericamente foram comparados com perfis de velocidade na camada limite para escoamento sobre placa plana. A comparação de velocidade entre as duas geometrias mostra que não há variação significativa na velocidade com a inserção das juntas. Já para pressão, nota-se o surgimento de pressões negativas junto ao vértice das juntas. Foram calculados os índices de cavitação, que indicaram a região final da calha com juntas de concretagem com maior possibilidade de haver cavitação.

Palavras-chave: Vertedouro salto esquí; simulação numérica; Ansys.

## ABSTRACT

Spillways are hydraulic structures that ensure the safety of a dam, allowing the passage of excess water downstream. Spillways are subject to pathological manifestations of concrete structures due to the passage of flows with high speeds. This study aimed to evaluate the use of numerical simulations of the flow to analyze hydraulic aspects associated with pathologies in the concrete of the ski jump spillway. The Furnas Hydroelectric Power Plant ski jump spillway was studied. The structure has total width of 80.5 m. The simulations were done at prototype scale for a geometry with concreting joints and a geometry without joints. Flow rates equal of 2089 m<sup>3</sup>/s, 1684 m<sup>3</sup>/s and 779 m<sup>3</sup>/s were simulated. These flows were observed in real structure. The numerical simulations were made with the Ansys – CFX software that use the finite volume method to solve the flow equation. Turbulence was modeled using the Reynolds decomposition (RANS - Reynolds Averaged Navier-Stokes). The turbulence model used was the k-ε. For discretization of the geometric domain, an unstructured tetrahedral mesh was defined, with approximately 10<sup>5</sup> elements in the geometry without concreting joints and 10<sup>6</sup> elements in the geometry with concreting joints. For the two structures analyzed, results were obtained for five points distributed along the spillway chute. The velocity profiles obtained numerically were compared with velocity profiles in the boundary layer. Comparison of speed and pressure between two geometries evidences that there is no significant variation in speed with insertion of the joints. As for pressure, the appearance of negative pressures is noted at the edge of the joints. Cavitation indices were calculated, which indicated regions which indicated the final region of the spillway with possibility of having cavitation.

Key words: ski jump spillway; numerical simulation; Ansys.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Superfície de concreto com dano causado por abrasão. Fonte: VON FAY, 2015. .	18
Figura 2 - Cavitação em superfícies irregulares. Fonte: adaptado de GRAHAM <i>et al.</i> , 1998.	21
Figura 3 - Erosão em superfície de concreto causada por cavitação. Fonte: MACINNIS, 1992. .....	22
Figura 4 – Previsão da zona potencial de cavitação para (a) $\sigma_i = 0,402$ , (b) $\sigma_i = 0,255$ , (c) $\sigma_i = 0,190$ , e (d) $\sigma_i = 0,158$ . Fonte: WAN, LIU e RAZA, 2018. ....	24
Figura 5 - Vertedouro salto esqui da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Fonte: Itaipu Binacional. .	25
Figura 6 - Distribuição de velocidade em um plano central ao longo da calha do vertedouro. Fonte: WAN, LIU e RAZA, 2018. ....	27
Figura 7 - Exemplo de malha computacional bidimensional (a) estruturada e (b) não estruturada. Fonte: ÇENGEL e CIMBALA, 2015. ....	31
Figura 8 –UHE Furnas com o vertedouro em funcionamento. Fonte: Furnas Centrais Elétricas. .....	33
Figura 9 - Representação do vertedouro da UHE Furnas. Dimensões em metros. Fonte: Projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas - RELATÓRIO DE PRODUTO ETAPA 2 – ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA (R2.1) - IPH/UFRGS VERSÃO 1/PARTE 01. ....	35
Figura 10 - Geometria utilizada nas simulações numéricas do escoamento. ....	35
Figura 11 - Detalhe da geometria na região da comporta.....	36
Figura 12 - Dano na calha do vertedouro em região intermediária da calha. Fonte: Projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas - RELATÓRIO DE PRODUTO ETAPA 2 – ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA (R2.1) - IPH/UFRGS VERSÃO 1/PARTE 01. ....	37

Figura 13 - Dano na calha do vertedouro no segmento mais a jusante. Fonte: Projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas - RELATÓRIO DE PRODUTO ETAPA 2 – ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA (R2.1) - IPH/UFRGS VERSÃO 1/PARTE 01. ....	37
Figura 14 - Detalhe da geometria na região da junta de concretagem. ....	38
Figura 15 - Detalhe da posição dos pontos de obtenção de dados na região da junta (sem escala). ....	42
Figura 16 - Malha computacional.....	45
Figura 17 - Malha computacional com refinamento na região da superfície livre.....	46
Figura 18: Perfis de velocidade em (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4 e (e) ponto 5 para as diferentes malhas analisadas. ....	48
Figura 19: Perfis de velocidade em (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4 e (e) ponto 5 para a malha com médio grau de refinamento com as barras de erro devido à discretização. ....	49
Figura 20 – Fração de ar-água para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	51
Figura 21 - Perfis de velocidade para diferentes vazões no ponto 2. ....	52
Figura 22 - Perfis de velocidade para diferentes vazões no ponto 3. ....	53
Figura 23 - Perfis de velocidade ao longo da calha sem juntas para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .....	54
Figura 24 - Vetores velocidade para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ com destaque para a região da comporta, região central e final da calha. ....	55
Figura 25 - Ajuste do perfil de velocidade para $Q = 779 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....	56
Figura 26 - Perfis de velocidade na região da junta para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ no ponto 3. ....	57
Figura 27 - Perfis de velocidade na região da junta para $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ no ponto 4. ....	57

Figura 28 – Perfis de velocidade para as duas geometrias na região do ponto 1 para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .	58
Figura 29 - Perfis de velocidade para as duas geometrias na região do ponto 1 para $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ .	58
Figura 30 – Pressões no vertedouro com calha sem juntas para diferentes vazões.	59
Figura 31 - Comparação entre pressões das duas geometrias para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .	60
Figura 32 - Comparação entre pressões das duas geometrias para $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ .	60
Figura 33 - Comparação entre pressões das duas geometrias para $Q = 779 \text{ m}^3/\text{s}$ .	61
Figura 34 - Pressões na região mais a jusante da calha (geometria sem juntas) para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .	62
Figura 35 - Pressão na região do ponto 4 para $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ e geometria com juntas na calha.	62
Figura 36 –Índice de cavitação para as vazões simuladas. Os pontos sem preenchimento correspondem aos resultados para a calha com juntas.	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do vertedouro da UHE Furnas .....	34
Tabela 2 - Informações sobre as vazões simuladas. ....	41
Tabela 3 - Profundidade do escoamento para as diferentes vazões simuladas.....	50
Tabela 4 - Índice de cavitação calculado para os pontos do vertedouro com calha sem juntas. .....	63
Tabela 5 - Índice de cavitação calculado para os pontos do vertedouro com calha com junta.	63

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $C_\mu$  – constante para cálculo da viscosidade turbulenta;
- $GCI^{21}$  – GCI para a malha com médio grau de refinamento;
- $h$  – profundidade do escoamento (m);
- $h'$  – valor representativo a ser utilizado no método GCI;
- $h'_{\text{coarse}}$  – valor representativo da malha menos refinada do método GCI;
- $h'_{\text{fine}}$  – valor representativo da malha mais refinada do método GCI;
- $k$  – energia cinética da turbulência por unidade de massa ( $m^2/s^2$ );
- $p$  – ordem local de acurácia do método GCI;
- $p'$  – pressão modificada (Pa);
- $P_a$  – pressão ambiente (Pa);
- $P_v$  – pressão de vapor (Pa);
- $Q$  – vazão ( $m^3/s$ );
- $q(p)$  – função dependente da ordem local de acurácia do método GCI;
- $r$  – fator de refinamento do método GCI;
- $r_{21}$  – fator de refinamento entre a malha com refinamento médio e a malha menos refinada;
- $r_{31}$  – fator de refinamento entre a malha mais refinada e a malha com refinamento médio;
- $s$  – função utilizada no cálculo do GCI;
- $S_M$  – somatório das forças gravitacionais;
- $t$  – tempo (s);
- $U$  – velocidade externa à camada limite (m/s);
- $u$  – velocidade no ponto  $Y$  (m/s);
- $U_{j,i}$  – Série temporal de velocidade (m/s);
- $V$  – velocidade do escoamento (m/s);
- $Y$  – posição no perfil de velocidade (m);

$e_a^{21}$  – erro absoluto calculado com os valores da malha intermediária e malha menos refinada (m/s);

$\varepsilon$  – taxa de dissipação da energia cinética turbulenta ( $m^2/s^3$ );

$\varepsilon_{21}$  – diferença entre valores obtidos com a malha intermediária e malha mais refinada (m/s);

$\varepsilon_{32}$  – diferença entre valores obtidos com a malha menos refinada e malha intermediária (m/s);

$\delta$  – espessura da camada limite turbulenta (m);

$\mu$  – viscosidade dinâmica ( $N/m^2.s$ );

$\mu_t$  – viscosidade turbulenta ( $N/m^2.s$ );

$\rho$  – massa específica do fluido ( $kg/m^3$ );

$\sigma$  – índice de cavitação;

$\sigma_i$  – índice de cavitação crítico;

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO .....</b>	<b>16</b>
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
3.1	EROSÃO DA SUPERFÍCIE DE CONCRETO .....	17
<b>3.1.1</b>	<b>Abrasão.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Cavitação .....</b>	<b>19</b>
3.2	CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE VERTEDOUROS SALTO ESQUI.....	24
3.3	SIMULAÇÃO NUMÉRICA .....	27
<b>3.3.1</b>	<b>Equações governantes .....</b>	<b>28</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Procedimento de solução.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3.3</b>	<b>Malha computacional .....</b>	<b>30</b>
3.4	ESCOAMENTO EM CALHA LISA .....	32
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>33</b>
4.1	ESTRUTURA ANALISADA .....	33
4.2	MODELO NUMÉRICO .....	38
<b>4.2.1</b>	<b>Software utilizado .....</b>	<b>39</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Condições de contorno .....</b>	<b>40</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Análise de dados .....</b>	<b>41</b>
<b>4.2.4</b>	<b>Definição da malha computacional.....</b>	<b>42</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
5.1	MALHA COMPUTACIONAL.....	47
5.2	SUPERFÍCIE LIVRE .....	50

5.3	VELOCIDADES .....	52
5.4	PRESSÕES.....	59
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Barragens são obras hidráulicas construídas para diversos usos e que trazem benefícios à população, como abastecimento de água, regularização de vazões e geração de energia elétrica. Apesar dos benefícios, elas também possuem danos potenciais para a população e para o meio ambiente ao seu redor. Dada a sua importância e influência no meio, é preciso manter a integridade do barramento e das suas estruturas associadas. Para minimizar o risco de incidentes e acidentes, a barragem deve passar por cuidados importantes durante a fase de projeto, execução da obra e operação do empreendimento.

As medidas tomadas em relação à segurança de barragens propõem revisões periódicas considerando possíveis alterações resultantes do envelhecimento e deterioração das estruturas. No Brasil são identificadas mais de 20 mil barragens cadastradas no Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (ANA, 2020). Este grande número evidencia a importância da realização de estudos relacionados a segurança de barragens.

Um dos principais componentes das barragens são os vertedouros, que são estruturas diretamente associadas à segurança de um barramento, permitindo o escoamento do excesso de água para jusante de maneira eficiente. Sendo assim, é fundamental garantir o funcionamento adequado e seguro desta estrutura conforme os fins para os quais esta foi projetada.

O concreto utilizado na construção de estruturas hidráulicas, como é o caso do vertedouro, deve resistir às cargas e às solicitações impostas. Além disso, é essencial que o concreto tenha uma vida útil que atenda o seu propósito, sendo capaz de suportar os processos danosos aos quais está sujeito.

Os vertedouros estão submetidos a escoamentos associados a altas velocidades, o que favorece o aparecimento de manifestações patológicas no concreto ao longo da sua calha. Inspeções realizadas em usinas hidrelétricas que possuem vertedouro salto esqui

mostram desgaste no concreto da calha apresentando regiões com erosão (FARIAS *et al.*, 2019; TORTORELLO; SOBRINHO; ANDRADE, 2001).

A durabilidade do concreto das estruturas depende da sua fabricação e da sua capacidade de resistir aos processos externos de deterioração (FUSCO; ONISHI, 2017). O escoamento atua como um agente agressivo ao concreto, desta forma, as grandes descargas experimentadas ao longo dos anos de funcionamento das usinas é um dos fatores responsáveis por desgastes na calha do vertedouro.

De acordo com Neville (2016), a natureza dos desgastes do concreto pode ser mecânica, química e física. Os desgastes mecânicos podem ser causados principalmente por impactos, abrasão e cavitação. Os danos por ações químicas são causados por reações deletérias e por ataque químico externo. A deterioração de natureza física compreende os danos causado pela temperatura, incluindo gelo e degelo. No presente estudo, o enfoque principal será dado apenas às manifestações patológicas de natureza mecânica relacionadas ao fluxo de água.

Como vertedouros são estruturas complexas e desempenham uma função importante, são recomendados estudos em modelos físicos e/ou numéricos para avaliar e verificar condições gerais do escoamento.

A modelagem numérica é uma ferramenta importante na análise de escoamentos, podendo complementar estudos experimentais. Os estudos desenvolvidos em modelos numéricos possibilitam estudar estruturas hidráulicas com diferentes configurações. Por exemplo, é possível analisar os efeitos de variações na geometria de vertedouros de forma mais rápida e barata se comparado com os modelos físicos. O presente estudo busca avaliar a possibilidade de utilizar simulações numéricas do escoamento em vertedouros com foco na análise de grandezas associadas a manifestações patológicas do concreto.

## **2 OBJETIVO**

Este trabalho tem como objetivo avaliar a utilização de simulações numéricas baseadas na metodologia RANS de modelagem do escoamento para analisar grandezas hidráulicas associadas a manifestações patológicas no concreto da calha de vertedouros salto esqui.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analisar numericamente perfis de velocidade do escoamento;
- Analisar numericamente pressões na calha do vertedouro;
- Analisar numericamente o efeito das juntas de concretagem no escoamento.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item são apresentados conceitos e definições sobre algumas das manifestações patológicas que ocorrem na superfície de concreto de estruturas hidráulicas. Em seguida, são apresentados conceitos sobre escoamento em vertedouros salto esqui e, também, sobre modelos numéricos.

#### 3.1 EROÇÃO DA SUPERFÍCIE DE CONCRETO

A erosão do concreto de superfícies hidráulicas ocorre principalmente por abrasão, cavitação e ataque químico (GRAHAM *et al.*, 1998).

##### 3.1.1 Abrasão

Em estruturas hidráulicas de concreto, a abrasão ocorre devido ao efeito abrasivo das partículas sólidas transportadas pela água. Este fenômeno ocorre quando a estrutura está sujeita a escoamento em alta velocidade contendo sedimentos (LEÃO, 2017). As partículas, tais como, silte, areia e cascalho, colidem contra a superfície de concreto (GRAHAM *et al.*, 1998; KORMANN, 2002).

Geralmente, quando a abrasão é decorrente de partículas pequenas, os danos no concreto são identificados por uma superfície lisa com aparência desgastada, (GRAHAM *et al.*, 1998; VON FAY, 2015). A Figura 1 apresenta os danos causados por abrasão devido ao fluxo de água com pequenas partículas sólidas, neste caso, os agregados maiores do concreto ficaram expostos. A cobertura de concreto de vertedouros é suscetível à abrasão devido ao fluxo em alta velocidade a qual está submetido (KORMANN, 2002).



Figura 1 - Superfície de concreto com dano causado por abrasão. Fonte: VON FAY, 2015.

A taxa de erosão depende de fatores que incluem características das partículas transportadas, qualidade do concreto e velocidade do escoamento (GRAHAM *et al.*, 1998). Escoamentos mais turbulentos tendem a gerar danos mais abrangentes (KORMANN, 2002).

O processo de erosão por abrasão inicia-se com um desgaste superficial que deixa os agregados do concreto descobertos. Nesta etapa, o processo erosivo está fortemente relacionado com a velocidade do escoamento e com a pressão hidráulica (LEÃO, 2017; LIU; YEN; HSU, 2006). Ao sofrer erosão por abrasão, a estrutura de concreto fica

vulnerável a outras manifestações patológicas, incluindo fissuração e corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado (LEÃO, 2017).

Após o estágio inicial de abrasão, as partículas sólidas presentes no escoamento produzem fissuras na superfície de concreto. Este processo é comandado, principalmente, pelo tamanho das partículas. Por último, ocorre a abrasão do concreto, que está associada à dureza das partículas, velocidade do escoamento e qualidade do concreto (LIU; YEN; HSU, 2006).

A extensão dos danos causados por abrasão é dependente de muitas variáveis, como duração da exposição, forma da superfície, velocidade e características das partículas carregadas (VON FAY, 2015). São importantes os estudos para determinar as condições de escoamento para operação das estruturas hidráulicas, assim como também são necessários estudos para analisar as estruturas existentes. Dessa forma, pode-se associar os danos nas estruturas de concreto com determinadas características do escoamento. Mesmo em condições de fluxo adequadas, a estrutura pode estar suscetível à erosão (GRAHAM *et al.*, 1998; VON FAY, 2015). A taxa de danos por abrasão pode ser reduzida propondo melhorias aos materiais utilizados aliadas à redução de condições hidráulicas adversas (GRAHAM *et al.*, 1998).

### **3.1.2 Cavitação**

Estruturas hidráulicas estão sujeitas a erosão da superfície de concreto pelo fenômeno da cavitação. Um concreto de boa qualidade é capaz de resistir à um escoamento uniforme e tangencial em alta velocidade, porém o processo de cavitação pode causar danos na superfície de concreto (NEVILLE, 2016).

De acordo com White (2002), o processo de cavitação ocorre quando a pressão do líquido, neste caso a água, cai abaixo da sua pressão de vapor. A pressão de vapor é a pressão à qual um líquido vaporiza e está em equilíbrio com seu próprio vapor. A pressão de vapor também pode ser definida como a pressão exercida pelo vapor da água em uma dada temperatura (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Cavitação é a formação de bolhas ou cavidades no escoamento, que estão preenchidas por vapor de água. Este fenômeno ocorre onde a pressão local cai até atingir a pressão de vapor e o líquido vaporiza sem alteração na temperatura (GRAHAM *et al.*, 1998).

A cavitação pode ter origem na presença de pequenas quantidades de ar não dissolvido na água ou em pequenas partículas, que se comportam como núcleos de cavitação microscópicos (FALVEY, 1990; NEVILLE, 2016). Entretanto, determinadas concentrações de ar podem amortecer o colapso das bolhas, diminuindo os danos causados pela cavitação, assim, a aeração da água pode ser um fator importante na prevenção de danos (NEVILLE, 2016).

Na cavitação, ocorre a descontinuidade da interface fluido-sólido devido à redução da pressão local (FALVEY, 1990). As irregularidades presentes na superfície de concreto podem provocar a formação de bolhas ou cavidades no escoamento. Geralmente, a queda de pressão ocorre de maneira abrupta próxima a essas superfícies e está associada a altas velocidades (GRAHAM *et al.*, 1998). A Figura 2 mostra exemplos de superfícies irregulares que podem desencadear a formação de cavitação. Estas irregularidades podem representar juntas de dilatação e concretagem presentes na calha do vertedouro e uma superfície de concreto que já apresente irregularidades devido a processos erosivos ou falta de acabamento na etapa de construção. Uma vez iniciada, a taxa de erosão tende a aumentar, pois os agregados expostos podem se tornar focos de geração de cavidades (GRAHAM *et al.*, 1998).

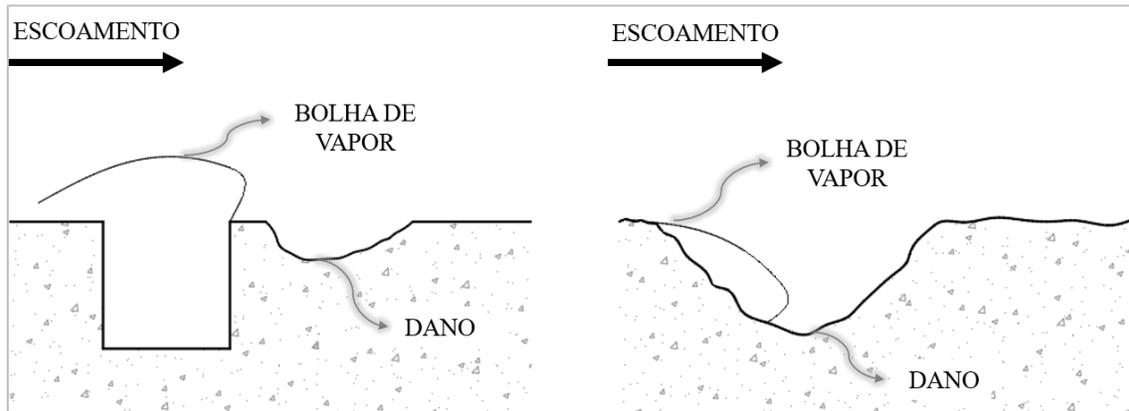


Figura 2 - Cavitação em superfícies irregulares. Fonte: adaptado de GRAHAM *et al.*, 1998.

Ao atingir uma região em que a pressão é maior que a pressão de vapor, as bolhas colapsam imediatamente, podendo fragmentar e erodir a superfície (ÇENGEL; CIMBALA, 2015; WHITE, 2002). O rompimento das bolhas de vapor causa a entrada de água em alta velocidade nos espaços anteriormente preenchidos por vapor de água, gerando uma pressão instantânea alta em uma pequena área. O impacto frequente causa a formação de cavidades na superfície de concreto (FALVEY, 1990; NEVILLE, 2016). A Figura 3 mostra uma superfície de concreto com erosão causada por processos de cavitação.

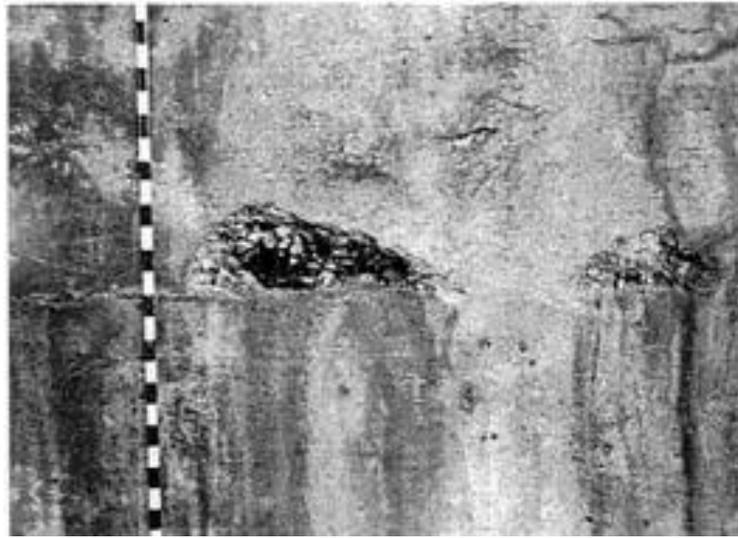


Figura 3 - Erosão em superfície de concreto causada por cavitação. Fonte: MACINNIS, 1992.

Para caracterizar a suscetibilidade do sistema a sofrer cavitação, pode ser usado o índice de cavitação ( $\sigma$ ). Esta relação adimensional é apresentada na Equação 1. Geralmente, a possibilidade de cavitação aumenta com a redução do número de cavitação. De acordo com a geometria, o escoamento tem um valor crítico ( $\sigma_i$ ) abaixo do qual o escoamento poderá cavitado (WHITE, 2002). Falvey (1990) observou que ocorreram danos significativos em vertedouros quando o índice de cavitação do fluxo é menor que 0,20.

$$\sigma = \frac{P_a - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad 1$$

onde:  $\sigma$  é o índice de cavitação,  $P_a$  e  $P_v$  representam, respectivamente, a pressão ambiente e a pressão de vapor,  $\rho$  é a massa específica do fluido e  $V$  representa a velocidade do escoamento.

Estudos sobre erosão causada por cavitação em superfícies de concreto de vertedouros indicam que muitas áreas estão sujeitas a danos graves, que são intensificados conforme o incremento da vazão. Estudos indicam que os maiores danos causados por cavitação ocorrem no final da calha do vertedouro (KERMANI; BARANI; GHAEINI-HESSAROEYEH, 2013), como é esperado por serem regiões onde as velocidades são mais elevadas.

Gadge, Bhajantri e Bhosekar, (2018) estudaram o escoamento sobre um vertedouro salto esqui em modelo físico escala 1:50 e consideraram o valor de 0,2 como valor crítico para o índice de cavitação e obtiveram valores entre 0,59 e 0,67, superiores à 0,2 nos pontos de análise ao longo da calha.

Wan, Liu e Raza (2018) utilizaram um modelo numérico para prever o potencial de cavitação em escoamentos sobre um vertedouro com aproximadamente 240 m de extensão. Os autores estudaram a cavitação em escoamento de alta velocidade utilizando a dinâmica de fluidos computacional (CFD), através da modelagem RANS e utilizam a metodologia VOF (*Volum of Fluid*) para simulação da superfície livre. A possibilidade de cavitação foi analisada considerando pressão e velocidade do escoamento. Foi calculado o índice de cavitação e observou-se que os valores diminuem de montante para jusante em um plano central do vertedouro, sendo encontrado o valor mínimo de 0,145 e máximo de 0,402. Foram considerados diferentes valores de  $\sigma_i$ , que variam de acordo com o tamanho da irregularidade da calha do vertedouro. Os valores utilizados variam de 0,158 a 0,402. A Figura 4 apresenta uma previsão de zona potencial de cavitação para diferentes valores de índice de cavitação crítico.

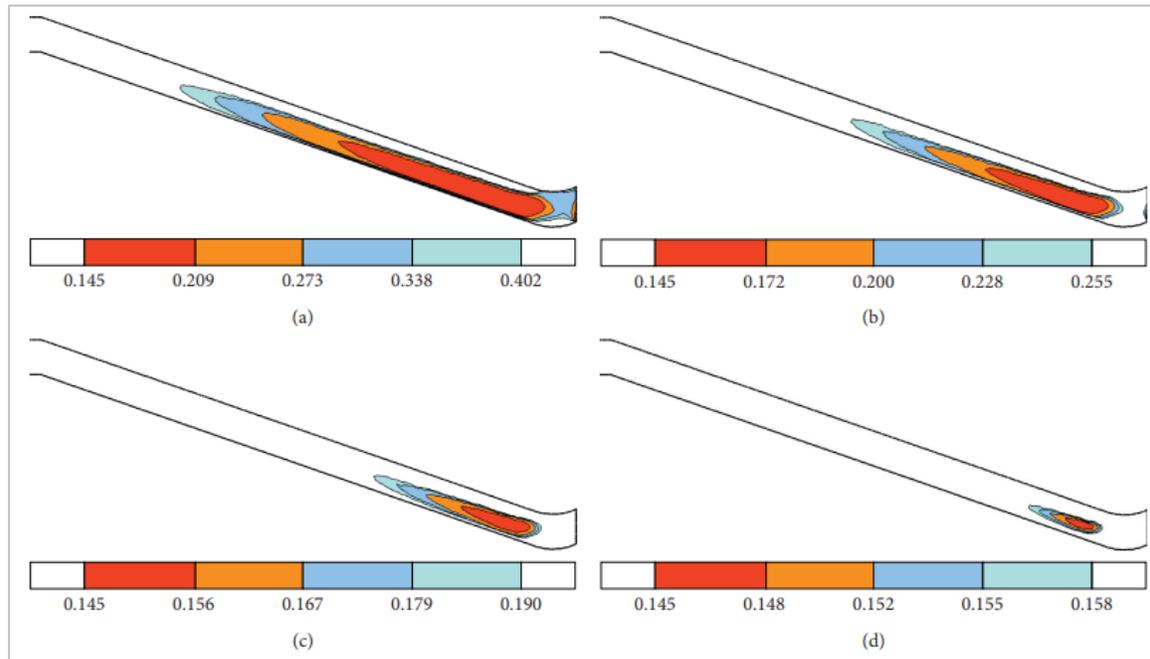


Figura 4 – Previsão da zona potencial de cavitação para (a)  $\sigma_i = 0,402$ , (b)  $\sigma_i = 0,255$ , (c)  $\sigma_i = 0,190$ , e (d)  $\sigma_i = 0,158$ . Fonte: WAN, LIU e RAZA, 2018.

Nas quatro condições analisadas, foram obtidas as regiões em que o índice de cavitação foi menor que o índice de cavitação crítico. A situação que possui o maior valor de  $\sigma_i$  (Figura 4a) apresenta maiores regiões com risco de sofrer cavitação, enquanto a condição com menor valor de  $\sigma_i$  (Figura 4d) apresenta uma região menor com risco de sofrer cavitação. Em todos os casos analisados, a zona final da calha possui os menores índices de cavitação (WAN, LIU e RAZA, 2018)

### 3.2 CONSIDERAÇÕES GERAIS SOBRE VERTEDOUROS SALTO ESQUI

Vertedouros salto esqui são estruturas relacionadas à dissipação de energia de escoamentos em alta velocidade. Eles possuem uma calha rápida seguida de uma concavidade que altera a direção do fluxo formando um jato. Neste sistema dissipador, após o vertedouro é formada uma fossa de dissipação (BORJA, 2012). A Figura 5 apresenta um exemplo de vertedouro tipo salto esqui onde é possível identificar o jato de lançamento ao final da calha.



Figura 5 - Vertedouro salto esqui da Usina Hidrelétrica de Itaipu. Fonte: Itaipu Binacional.

Nesta estrutura, a maior parte da dissipação de energia ocorre no impacto do jato com o colchão d'água a jusante, formando a fossa de erosão. Uma das complexidades de obras como esta é fazer a previsão da fossa de jusante para que não haja comprometimento da estrutura pela erosão do leito (BORJA, 2012).

O dimensionamento de um vertedouro salto esqui é complexo e depende de características como topografia, geotecnia e frequência de operação (BORJA, 2012). Vertedouros do tipo salto esqui são obras hidráulicas importantes para a dissipação de energia de escoamentos com alta velocidade. Os estudos envolvendo vertedouro salto esqui abordam, em sua maioria, as características hidráulicas da concha de lançamento e do jato (HELLER *et al.*, 2005; LAURIA; ALFONSI, 2020).

Gadge, Bhajantri e Bhosekar, (2018) avaliaram o desempenho de um vertedouro salto esqui controlado por comportas para diferentes vazões. Foram medidas pressões ao longo da calha. Em grande parte das vazões, as pressões medidas foram pressões positivas. Em uma pequena parcela das vazões foram observadas pressões negativas. De maneira

geral, as pressões diminuem da crista do vertedouro até o início da concha de lançamento e aumentam no interior da concha.

Lauria e Alfonsi, (2020) estudaram o escoamento sobre vertedouros salto esqui utilizando um modelo numérico com foco nas pressões na concha de lançamento e na trajetória do jato. Os autores utilizaram o software OpenFOAM, com modelo de turbulência  $k-\omega$  SST. A superfície livre foi modelada com o método VOF (*volume of fluid*) e forneceu resultados satisfatórios. O escoamento foi simulado com metodologia RANS. As equações governantes foram aproximadas pelo método dos volumes finitos, com discretização do domínio feita com malha não estruturada. Os autores consideram que as características do escoamento estudadas foram bem representadas pelas simulações numéricas, sendo uma opção favorável para reproduzir corretamente os fenômenos estudados.

Kirkgoz, Akoz e Oner (2009) simularam o escoamento sobre um vertedouro salto esqui de 1,80 m de extensão. As equações do escoamento foram resolvidas utilizando o método dos elementos finitos e com os modelos de turbulência  $k-\omega$  (padrão) e  $k-\epsilon$ . A superfície livre foi modelada com o método VOF. Os resultados obtidos numericamente foram comparados com resultados experimentais. O modelo  $k-\epsilon$  foi o que apresentou melhor concordância com os valores experimentais.

Wan, Liu e Raza (2018) estudaram o escoamento sobre um vertedouro salto esqui utilizando um modelo numérico e as simulações foram feitas no software Fluent. Os autores analisaram campos de velocidade e de pressão distribuídos ao longo da calha do vertedouro. Também foram analisadas profundidades para compor o perfil da linha d'água. A Figura 6 apresenta a distribuição de velocidade em um plano central ao longo da calha do vertedouro obtida numericamente. Os vetores indicam que as maiores velocidades se encontram na zona final da calha do vertedouro.



Figura 6 - Distribuição de velocidade em um plano central ao longo da calha do vertedouro. Fonte: WAN, LIU e RAZA, 2018.

### 3.3 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

O objetivo de um método numérico é resolver as equações diferenciais envolvidas. Quando não é possível chegar a uma solução analítica, é feita uma aproximação numérica das equações diferenciais para um grupo discreto de pontos com um determinado erro (MALISKA, 2004).

A modelagem computacional é uma alternativa viável em muitas situações em que se deseja estudar o escoamento sobre vertedouros. Esta abordagem tem a facilidade de realizar ensaios com diversas configurações de geometria e condições de escoamento. Ainda, há a possibilidade de minimizar os efeitos de escala, uma vez que a modelagem numérica permite a simulação de estruturas em escala de protótipo. Apesar dessas possibilidades, a simulação numérica do escoamento requer uma série de cuidados em relação aos métodos escolhidos para que sejam representativos do escoamento.

A dinâmica dos fluidos computacional (CFD) é a área da engenharia dedicada à solução das equações do escoamento de fluidos através do uso de computadores

(ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Os métodos tradicionais utilizados por muitos dos softwares disponíveis são o método de diferenças finitas, método de volumes finitos e métodos de elementos finitos (MALISKA, 2004).

### 3.3.1 Equações governantes

Alguns cálculos do escoamento turbulento através de CFD utilizam a técnica de simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation* - DNS), que resolve o movimento transiente de todas as escalas do escoamento turbulento. No escoamento turbulento existe o princípio da cascata de energia, onde os maiores vórtices transferem energia aos menores vórtices, dando origem a turbilhões com diversos tamanhos característicos. Estas simulações acabam sendo inviáveis em muitos casos devido a exigência de malhas extremamente refinadas e alto custo computacional (ANSYS, 2011; ARANTES, 2007; ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

A simulação das grandes escalas (*Large Eddy Simulation* - LES) resolve os vórtices turbulentos transientes de grande escala e os vórtices turbulentos dissipativos de pequena escala são modelados. As simulações LES exigem custo computacional significativamente inferior às simulações DNS (ARANTES, 2007; ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Quando todos os vórtices temporários são modelados com modelos de turbulência, as características temporárias dos vórtices não são resolvidas. As equações básicas de Navier-Stokes são modificadas para representar as flutuações instantâneas da turbulência em termos médios. Neste caso a equação de Navier-Stokes é substituída pela equação de média de Reynolds de Navier – Stokes (*Reynolds-averaged Navier-Stokes* - RANS) (ANSYS, 2011; ARANTES, 2007; ÇENGEL; CIMBALA, 2015). A relação da conservação de massa é apresentada pela Equação 2. Em mecânica dos fluidos, a equação da conservação de massa para um volume de controle diferencial é chamada de equação da continuidade (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Já a Equação 3 é a equação de momentum.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad 2$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \mu_t) \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad 3$$

onde:  $t$  é o tempo,  $U$  representa a série temporal de velocidade, que pode ser decomposta em uma parcela média e uma parcela de flutuação, que é variável no tempo,  $\mu$  é a viscosidade dinâmica;  $\mu_t$  é a viscosidade turbulenta,  $p'$  é a pressão modificada ( $p' = p + 2/3 \cdot \rho \cdot k$ , com  $k$  igual a energia cinética da turbulência) e  $S_M$  é o somatório das forças gravitacionais (Ansys, 2013).

O modelo de turbulência  $k$ - $\epsilon$  assume que a viscosidade turbulenta está relacionada com a energia cinética turbulenta e a taxa de dissipação através da Equação

$$\mu_t = C_\mu + \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

onde:  $C_\mu$  é uma constante para cálculo da viscosidade turbulenta.

### 3.3.2 Procedimento de solução

De acordo com Çengel e Cimbala (2015), as etapas para solucionar as equações do escoamento através do método dos volumes finitos utilizando um código CFD são as descritas abaixo:

- Seleção do domínio geométrico e geração da malha computacional. O domínio é a região onde as equações são solucionadas. A malha divide a geometria em células tridimensionais, que são vistas como pequenos volumes de controle. No método dos volumes finitos, as equações de conservação são solucionadas nos centroides de cada volume de controle, e interpoladas para os centroides das faces dos volumes de controle.
- Especificação das condições de contorno, que são aplicadas em cada face do domínio.
- Indicar o tipo de fluido e suas propriedades, como temperatura, densidade, viscosidade.
- A maioria dos códigos CFD comerciais possuem pós-processadores, que permitem analisar os campos do escoamento, como velocidade e pressão.

### 3.3.3 Malha computacional

A geração da malha computacional é uma etapa importante de uma solução CFD. A malha define as células de todo o domínio nas quais as variáveis do escoamento serão calculadas (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

As malhas podem ser estruturadas ou não estruturadas. Em domínios tridimensionais, as malhas estruturadas são formadas por células volumétricas com seis faces, não necessariamente com formato retangular. É possível numerar cada célula com um índice. A Figura 7 (a) apresenta um exemplo de malha bidimensional estruturada com a indicação dos índices “i” e “j”. Neste caso, é possível identificar a célula sombreada pelos índices ( $i = 4$ ;  $j = 3$ ). Cada célula é identificada por um conjunto de índices exclusivo (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

As malhas não estruturadas podem possuir células de diversos formatos, para domínios tridimensionais, as formas mais comuns são tetraedros ou hexaedros. Ao

contrário das malhas estruturadas, não é possível identificar as células por um conjunto de índices exclusivo, como pode ser visto na Figura 7 (b). Em geral, malhas não estruturadas são mais fáceis de se adequar a geometrias complexas, mas o fator determinante para produzir boas simulações é a qualidade da malha. Existem alguns fatores que afetam a qualidade da malha, tais como distorção das células, variação brusca no tamanho das células e razão entre os tamanhos das arestas de um mesmo elemento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

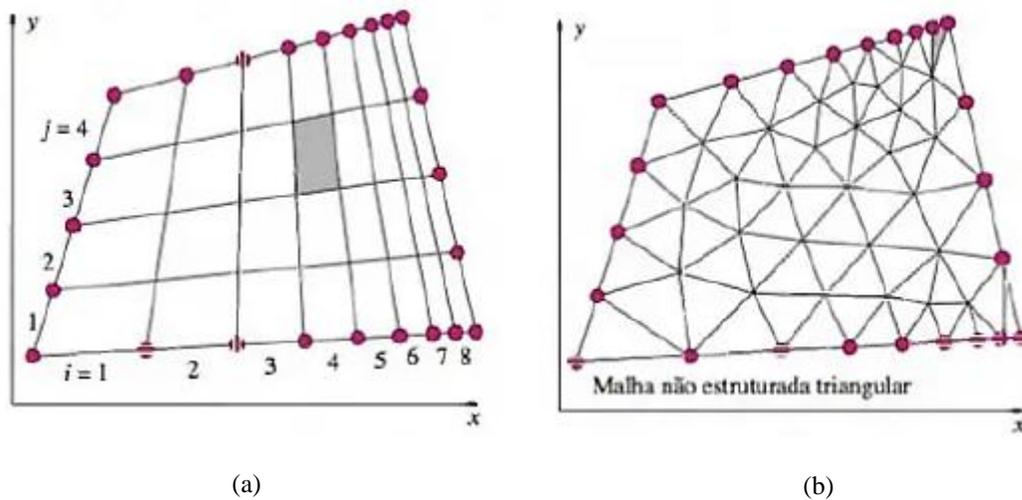


Figura 7 - Exemplo de malha computacional bidimensional (a) estruturada e (b) não estruturada. Fonte: ÇENGEL e CIMBALA, 2015.

É importante testar a independência da malha para gerar uma malha que não interfira no resultado das simulações numéricas. O método padrão para testar a independência da malha é aumentar o seu grau de refinamento e repetir a simulação. Se os resultados não forem alterados de maneira significativa, a malha provavelmente será adequada (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

### 3.4 ESCOAMENTO EM CALHA LISA

Neste item serão feitas considerações sobre o escoamento sobre placas planas. Essa abordagem é importante para o entendimento das grandezas do escoamento na calha de vertedouros salto esqui. Para comparação com a teoria clássica, a calha do vertedouro foi considerada como uma placa plana inclinada, uma vez que sua largura é grande o suficiente e os efeitos das paredes laterais pouco influentes.

O escoamento que passa por um canal ou escoar por uma placa plana, tem seu perfil de velocidade na seção transversal modificado pela interferência da superfície (CHOW, 1959; WHITE, 2002). Considerando que o fluido que escoar sobre uma placa plana é formado por camadas adjacentes umas sobre as outras, a velocidade das partículas na camada de fluido mais próxima à placa é igual a zero devido a condição de não deslizamento (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). Essa camada sem movimento retarda as camadas de fluido. A presença da placa tem influência no escoamento até uma certa distância normal da placa (ÇENGEL; CIMBALA, 2015).

Existem equações possíveis para ajuste de perfis de velocidade. Os perfis turbulentos de velocidade em uma placa plana podem ser aproximados por uma lei de potência conforme a Equação 5, proposta por Prandtl (WHITE, 2002).

$$\left(\frac{u}{U}\right) \cong \left(\frac{Y}{\delta}\right)^{\left(\frac{1}{7}\right)} \quad 5$$

onde:  $u$  e  $U$  representam, respectivamente, a velocidade no ponto  $Y$  e a velocidade externa à camada limite,  $Y$  é a posição no perfil de velocidade,  $\delta$  representa a espessura da camada limite turbulenta.

## 4 METODOLOGIA

Neste item será apresentada a metodologia empregada para o desenvolvimento deste trabalho. Este trabalho de conclusão de curso foi desenvolvido no âmbito do Programa de P&D ANEEL, projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas (P&D 00394-1706/2017), desenvolvido em cooperação entre Foz do Chapecó Energia, Eletrobrás-Furnas e o IPH/UFRGS.

### 4.1 ESTRUTURA ANALISADA

A estrutura hidráulica utilizada nesse trabalho é semelhante ao vertedouro da Usina Hidrelétrica de Furnas. A UHE Furnas foi construída no ano de 1965 no curso médio do Rio Grande, possui potência instalada de 1216 MW e altura máxima do barramento de 127 m. A Figura 8 apresenta a UHE Furnas e mostra o vertedouro em funcionamento.



Figura 8 –UHE Furnas com o vertedouro em funcionamento. Fonte: Furnas Centrais Elétricas.

O vertedouro é do tipo salto esqui e é controlado por comportas tipo segmento. A vazão de projeto do vertedouro é de 13.000 m<sup>3</sup>/s. A Tabela 1 apresenta algumas características da estrutura.

Tabela 1: Características do vertedouro da UHE Furnas.

Largura total (m)	80,5
Número de vãos	7
Largura por vão (m)	11,5
Cota da crista do vertedouro (m)	750,8

A Figura 9 apresenta a representação do vertedouro utilizado neste trabalho. Em vistoria realizada no ano de 2019, pela equipe do Projeto P&D intitulado Estudos de Concreto para Superfícies Hidráulicas, foi constatado que o vertedouro apresenta desgaste na superfície de concreto. As regiões que possuem mais danos estão identificadas por 5 pontos ao longo da calha e estão apresentados na Figura 9. É importante ressaltar que esses danos não comprometem a estabilidade da barragem e o funcionamento do vertedouro.

A geometria utilizada nas simulações é semelhante ao vertedouro da UHE Furnas e é apresentado na Figura 10. Considerando o escoamento simétrico, foi adotada uma largura de 1 m para o vertedouro simulado com a finalidade de reduzir o custo computacional. A Figura 11 apresenta um detalhe da região da comporta, indicando a abertura, que é variável conforme a vazão de vertimento.

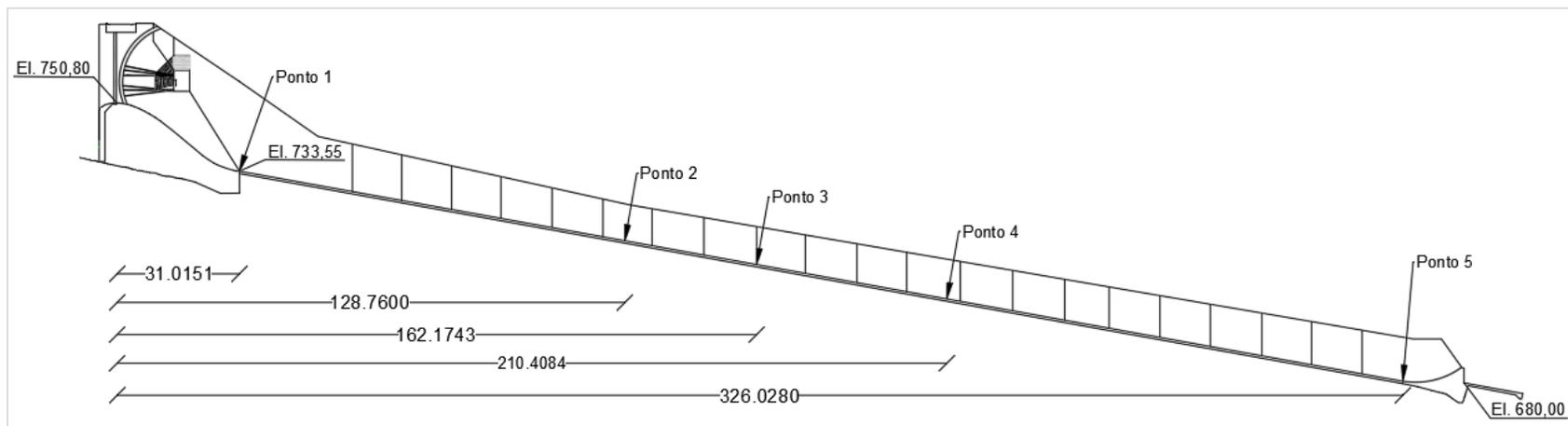


Figura 9 - Representação do vertedouro da UHE Furnas. Dimensões em metros. Fonte: Projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas - RELATÓRIO DE PRODUTO ETAPA 2 – ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA (R2.1) - IPH/UFRGS VERSÃO 1/PARTE 01.

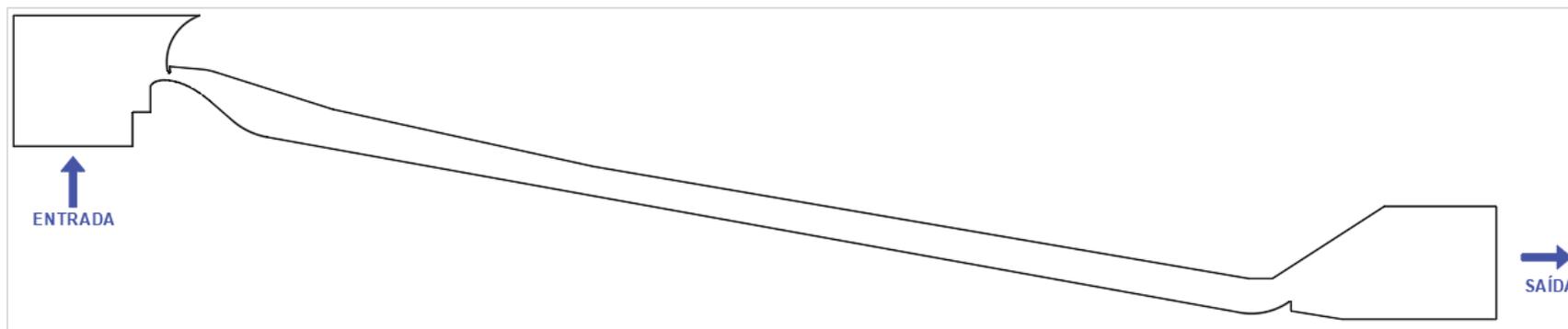


Figura 10 - Geometria utilizada nas simulações numéricas do escoamento.

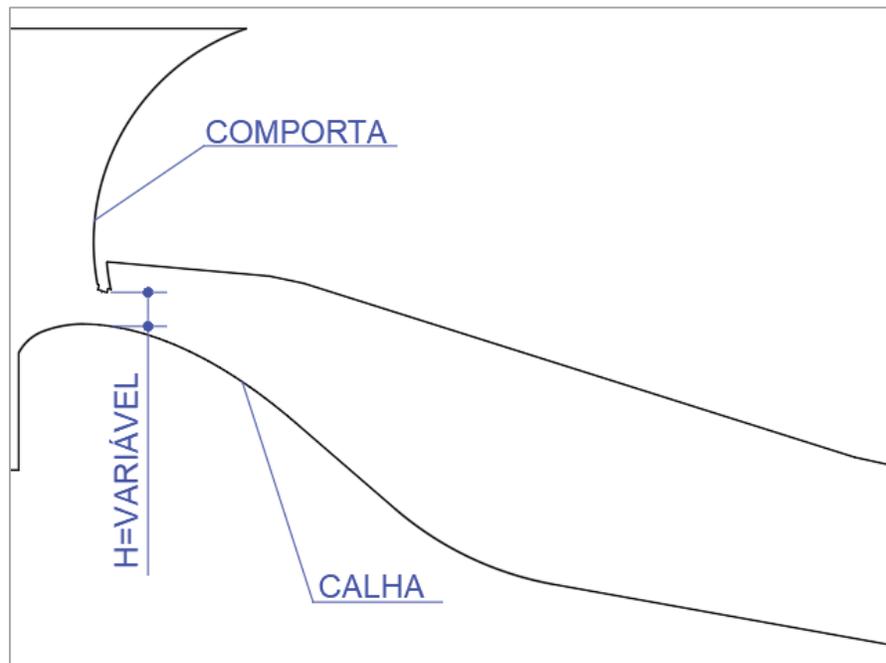


Figura 11 - Detalhe da geometria na região da comporta.

Os principais danos encontrados nas superfícies de concreto foram erosão, exposição de agregados e lixiviação e estão localizados na calha, muros e bacia de dissipação. A Figura 12 e a Figura 13 apresentam alguns dos danos observados na calha. A região da Figura 12 está em uma posição intermediária, próxima ao ponto 4 apresentado na Figura 9. E a região observada na Figura 13 está localizada no segmento mais a jusante da calha, próxima ao ponto 5 apresentado na Figura 9. Nas fotos observa-se regiões com erosões próximas as juntas de concretagem.



Figura 12 - Dano na calha do vertedouro em região intermediária da calha. Fonte: Projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas - RELATÓRIO DE PRODUTO ETAPA 2 – ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA (R2.1) - IPH/UFRGS VERSÃO 1/PARTE 01.



Figura 13 - Dano na calha do vertedouro no segmento mais a jusante. Fonte: Projeto Estudo de Concreto para Superfícies Hidráulicas - RELATÓRIO DE PRODUTO ETAPA 2 – ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA (R2.1) - IPH/UFRGS VERSÃO 1/PARTE 01.

Como foram relatados danos próximos das juntas, foram feitas simulações em um vertedouro com juntas ao longo da calha para avaliar as alterações no escoamento com a modificação da geometria. As juntas foram posicionadas nos mesmos pontos apresentados na Figura 9. A geometria considerada é apresentada na Figura 14.

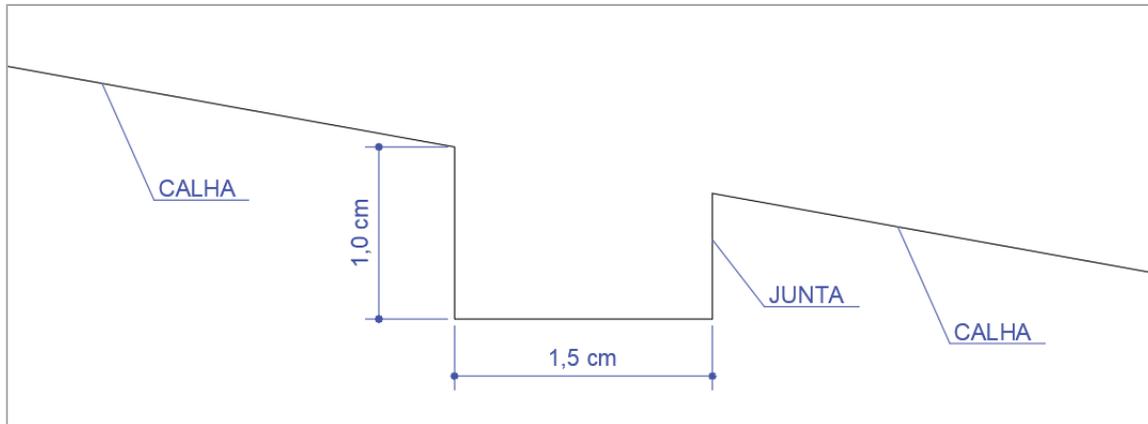


Figura 14 - Detalhe da geometria na região da junta de concretagem.

## 4.2 MODELO NUMÉRICO

Estudos desenvolvidos em modelos numéricos geralmente precisam passar pelo processo de validação para garantir que o modelo represente corretamente os fenômenos envolvidos. A estrutura analisada neste trabalho não dispõe de dados experimentais que permitam a calibração e validação do modelo numérico.

A calibração da simulação não será apresentada neste trabalho e foi realizada para um caso similar, que avaliou o escoamento sobre um vertedouro em degraus. O processo de calibração e validação usado neste trabalho é descrito em Tassinari *et al.*, (2020).

#### 4.2.1 Software utilizado

O conjunto de equações resolvidas pelo software Ansys-CFX, que será utilizado neste trabalho, são as equações de Navier-Stokes (ANSYS, 2011). Para estudos numéricos do escoamento sobre vertedouros é necessário utilizar um software que permita a simulação numérica de escoamentos turbulentos em uma geometria complexa. Neste trabalho foi utilizado o software Ansys CFX.

Existem vários modelos de turbulência sendo utilizados nas simulações numéricas de escoamentos turbulentos. Os modelos mais utilizados neste tipo de simulação são os modelos de duas equações, que adicionam outras duas equações de transporte a serem resolvidas juntamente com as equações de conservação de massa e de momentum (ÇENGEL; CIMBALA, 2015). A turbulência foi modelada com o modelo k- $\epsilon$ . Este modelo de turbulência já foi estudado por outros autores em simulações numéricas do escoamento em vertedouros apresentando resultados satisfatórios (*e. g.* CHEN *et al.*, 2002, TORO *et al.*, 2016).

A modelagem do escoamento foi feita com um modelo multifásico, em que os componentes envolvidos são água e ar. O modelo utilizado foi o VOF. Neste método, as equações do escoamento são resolvidas, armazenando o volume das duas fases fluidas em cada célula computacional. Nas células, a soma das frações de volume de ar e água é igual a unidade.

As simulações realizadas no Ansys passam pelas seguintes etapas: pré-processamento, processamento e pós processamento. O pré-processamento consiste em definir as características físicas da simulação após a inserção da geometria e da malha computacional (ANSYS, 2011). Nesta etapa é definida a malha computacional e são incluídos o modelo de turbulência, as propriedades dos fluidos envolvidos e as condições de contorno.

A etapa de processamento é feita através do solver. Pela interface do software é possível definir atributos para o cálculo CFD e visualizar informações sobre a solução

(ANSYS, 2011). Nesta abordagem, as equações de Navier-Stokes são substituídas por aproximações algébricas que serão resolvidas pelo método numérico. No pós-processamento é possível fazer a visualização e análise quantitativa dos resultados obtidos através da simulação.

O critério de convergência utilizado foi o valor residual máximo normalizado no domínio (MAX). Nas simulações foi adotado o valor objetivo de convergência de  $10^{-6}$ .

#### 4.2.2 Condições de contorno

As vazões simuladas foram vazões observadas na estrutura real. Estas vazões foram obtidas através de uma série de vazões relacionadas a eventos em que houve vertimento. Como o vertedouro é controlado por comportas, as vazões estão associadas as suas aberturas. Foram selecionadas três vazões: 2089 m<sup>3</sup>/s, 1684 m<sup>3</sup>/s e 779 m<sup>3</sup>/s. Todas as vazões escolhidas tiveram o acionamento de todas as comportas ao longo do vertimento.

As condições de contorno utilizadas foram as apresentadas a seguir:

- Entrada (*Inlet*): É a condição de entrada do escoamento na face do domínio geométrico. Nesta condição o fluido escoar somente para dentro do domínio. Foi definida uma vazão mássica associada a cada uma das três vazões. A direção de fluxo foi considerada normal à face de entrada. As informações sobre as vazões de entrada são apresentadas na Tabela 2.
- Saída (*outlet*): É a condição de saída do escoamento e representa que o fluido escoar somente para fora do domínio. Na face de saída foi considerado que o fluido está submetido a pressão atmosférica.
- Aberto (*opening*): Nesta condição, os fluidos, neste caso, ar e água podem escoar para dentro ou para fora do domínio. Foi aplicada na face que está submetida a pressão atmosférica.

- Parede (*wall*): A calha e as paredes foram consideradas rugosas (*Rough Wall*) com rugosidade de 0,06 mm (USACE, 1990).
- Plano de simetria (*symmetry*): Esta condição de contorno é aplicada quando o escoamento é simétrico e foi utilizada para simular uma geometria com largura inferior à largura da estrutura real. Esta condição é útil em situações em que se deseja reduzir o custo computacional. Foi utilizada uma largura de 1 m no vertedouro.

Tabela 2 - Informações sobre as vazões simuladas.

Vazão total (m <sup>3</sup> /s)	Vazão por comporta (m <sup>3</sup> /s)	Vazão unitária (m <sup>3</sup> /s.m)	Vazão mássica (kg/s)	Abertura da comporta (m)
2089	298,43	25,95	25.898,4	2,18
1684	240,57	20,92	20.877,4	1,70
779	111,29	9,68	9.657,7	0,69

### 4.2.3 Análise de dados

Os resultados foram obtidos e analisados nos 5 pontos ao longo da calha conforme apresentado na Figura 9 e estão posicionados no centro da calha. Nas simulações das juntas, os pontos de obtenção dos resultados estão exemplificados na Figura 15. Os resultados de velocidade foram analisados em perfis perpendiculares à calha.

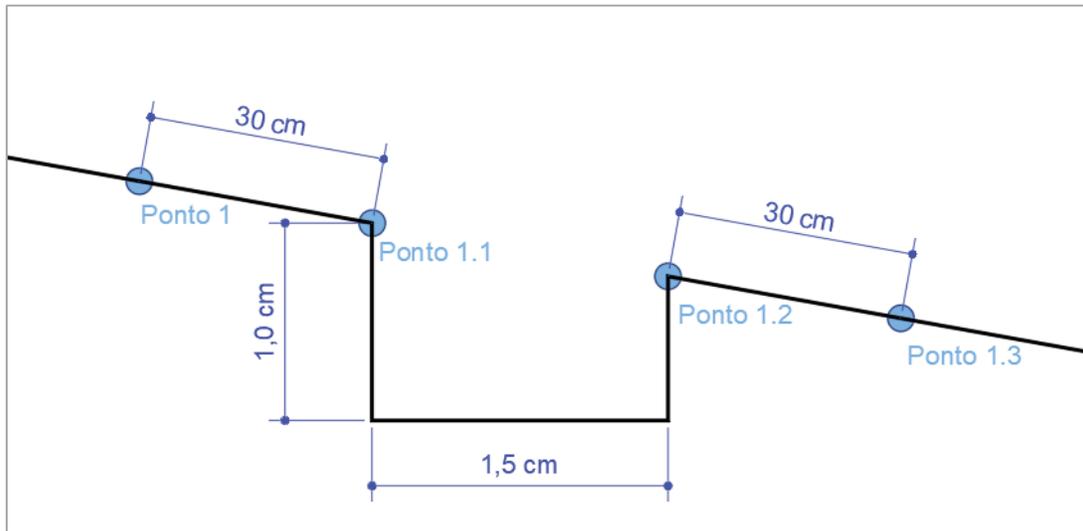


Figura 15 - Detalhe da posição dos pontos de obtenção de dados na região da junta (sem escala).

#### 4.2.4 Definição da malha computacional

O estudo de malhas computacionais foi feito com a método GCI (*Grid Convergence Index*), proposta por Celik *et al.*, (2008). O cálculo do GCI fornece a estimativa de erro de discretização em simulações CFD em que dados experimentais podem ou não estarem disponíveis. No presente estudo, não foram utilizados dados experimentais para análise dos resultados das simulações do estudo de malhas.

##### 4.2.4.1 Estimativa do erro de discretização da malha computacional

As equações utilizadas estão descritas em Celik *et al.*, (2008). Neste método, deve ser escolhido uma célula, malha ou tamanho de malha para o cálculo de um valor representativo  $h'$ . Foi utilizada a equação para cálculos tridimensionais utilizando como variável o número de elementos da malha. O valor  $h'$  foi calculado pela Equação 6. O valor de  $h$  foi calculado para as três malhas escolhidas, respeitando a relação  $h'_1 < h'_2 < h'_3$ . Ao longo das equações, o subíndice 1 está relacionado com a malha menos refinada (com menor número de elementos), o subíndice 2 está relacionado com a malha com grau de

refinamento médio e o subíndice 3 está relacionado com a malha mais refinada (maior número de elementos). O GCI foi calculado para a malha com grau de refinamento médio.

$$h' = (\text{Número de Elementos})^{\frac{1}{3}} \quad 6$$

Conforme a indicação do método, foram feitas simulações com malhas que apresentaram diferentes graus de refinamento. É desejável que o fator de refinamento seja maior do que 1/3. O fator de refinamento foi calculado com a Equação 7.

$$r = \frac{h'_{coarse}}{h'_{fine}} \quad 7$$

onde:  $h'_{coarse}$  e  $h'_{fine}$  representam, respectivamente, o valores representativo  $h'$  da malha com menor refinamento e da malha com maior refinamento.

A ordem local de acurácia aparente ( $p$ ) do método foi calculada com as Equações 8, 9 e 10.

$$p = \frac{1}{\ln(r_{21})} |\ln|\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}| + q(p)| \quad 8$$

onde:  $p$  é a ordem local de acurácia,  $r_{21}$  é o fator de refinamento entre a malha com refinamento médio e a malha menos refinada,  $\varepsilon_{32}$  e  $\varepsilon_{21}$  representam, respectivamente, diferença entre valores obtidos com a malha menos refinada e malha intermediária e a

diferença entre valores obtidos com a malha intermediária e malha mais refinada e  $q(p)$  é a função calculada pela Equação 9.

$$q(p) = \ln \left( \frac{r_{21}^p - s}{r_{32}^p - s} \right) \quad 9$$

onde:  $r_{31}$  é o fator de refinamento entre a malha mais refinada e a malha com refinamento médio e  $s$  a função calculada pela Equação 10.

$$s = 1 \cdot \text{sgn}(\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}) \quad 10$$

O GCI foi calculado para os pontos que formam o perfil de velocidade nos cinco pontos descrito na Figura 9. O CGI é calculado com a aplicação da Equação 11.

$$GCI^{21} = \frac{1.25 \cdot e_a^{21}}{r_{21}^p - 1} \quad 11$$

onde:  $GCI^{21}$  é o GCI para a malha com médio grau de refinamento e  $e_a^{21}$  representa o erro absoluto calculado com os valores da malha intermediária e malha menos refinada.

#### 4.2.4.2 Características da malha utilizada

Para a discretização do domínio geométrico, foi definida uma malha não estruturada, tetraédrica, com aproximadamente  $3,1 \times 10^5$  nós e  $2,2 \times 10^5$  elementos para a geometria com calha sem juntas e  $1,5 \times 10^6$  nós e  $1,3 \times 10^6$  elementos para a geometria com calha com juntas, que possui maior refinamento da região das juntas. A Figura 16

apresenta a malha computacional gerada na região inicial do vertedouro. Na região da superfície livre foi usada adaptação de malha, que produz um refinamento no local, que pode ser visto na Figura 17. A adaptação de malha é o processo que ocorre durante o processamento da solução em que a malha é seletivamente refinada em locais onde as variáveis mudam rapidamente. No caso da superfície livre, a adaptação da malha ocorreu na região em que a fração ar/água se altera rapidamente ao longo da solução.

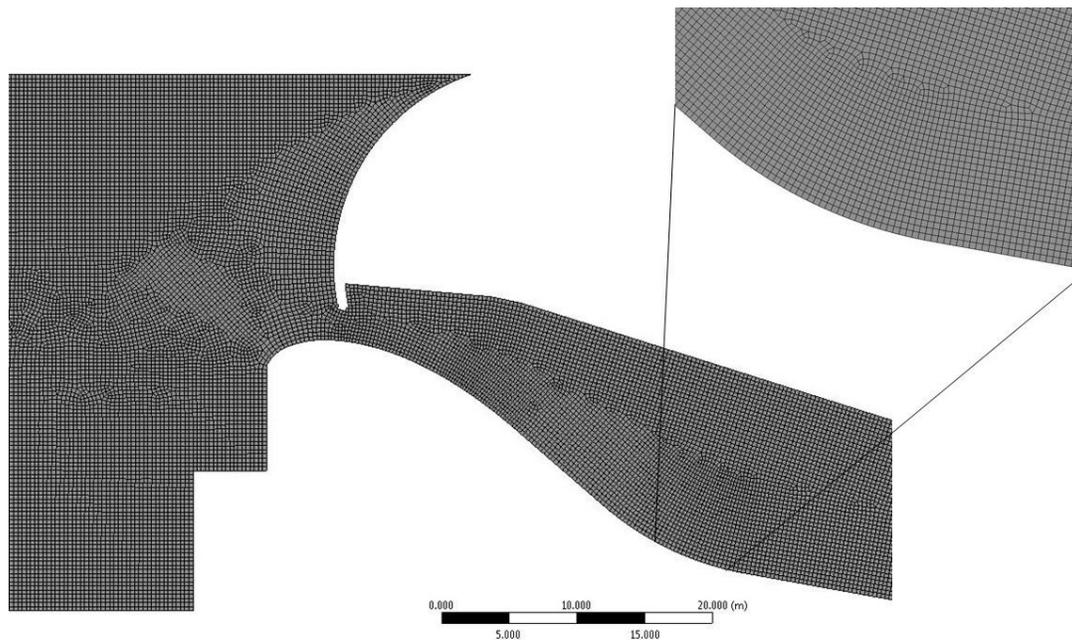


Figura 16 - Malha computacional.

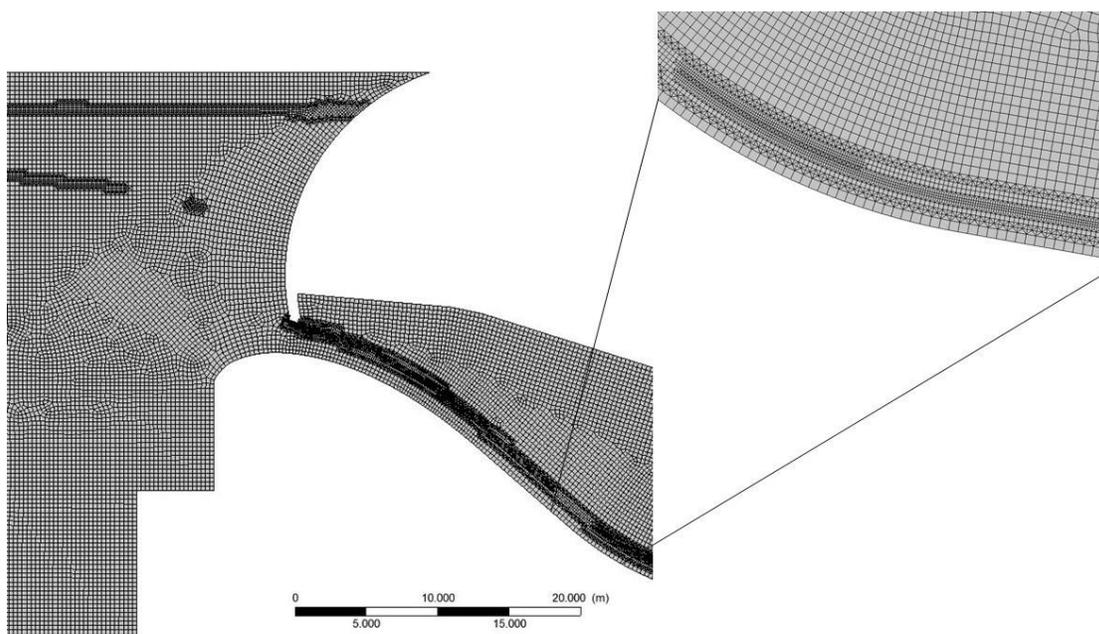


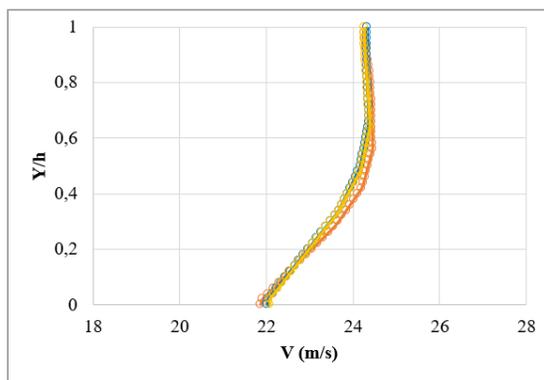
Figura 17 - Malha computacional com refinamento na região da superfície livre.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

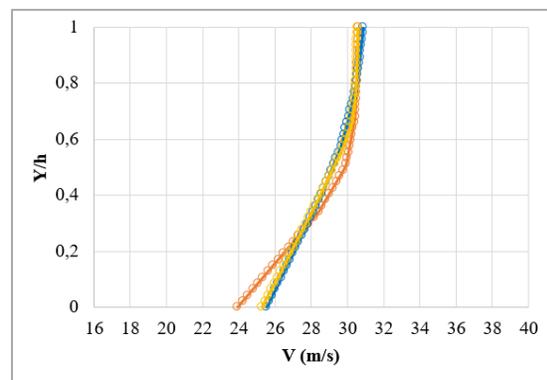
Neste item serão apresentados os principais resultados obtidos neste estudo.

### 5.1 MALHA COMPUTACIONAL

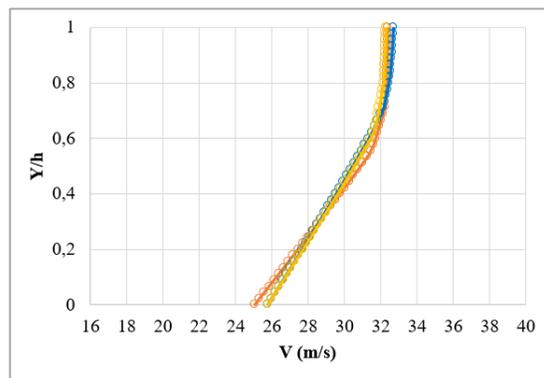
A análise da malha computacional foi feita para os pontos que formam os perfis de velocidade nos cinco pontos ao longo da calha, apresentados na Figura 9. A incerteza numérica média devido a malha escolhida varia de 0,95% a 12,0% nos cinco pontos avaliados. A Figura 18 apresenta os perfis de velocidade obtidos numericamente para as três malhas estudadas.



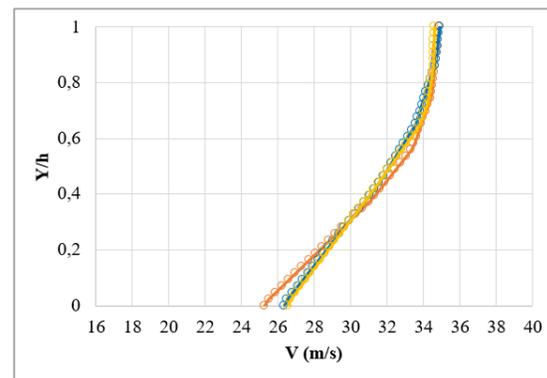
(a)



(b)



(c)



(d)

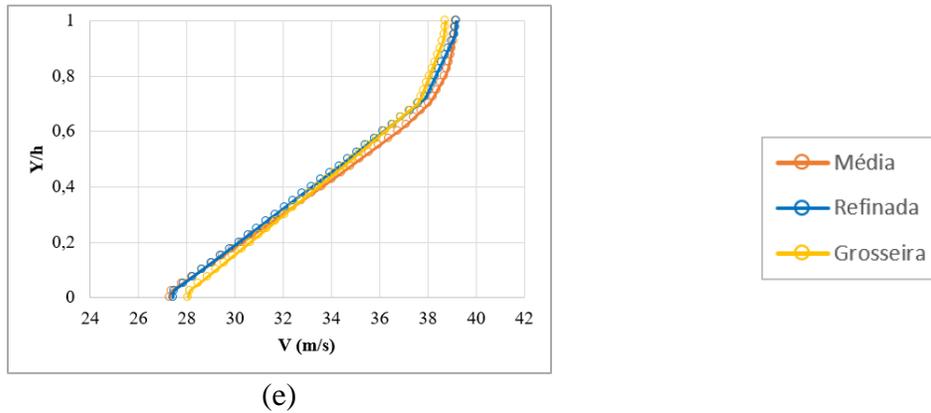
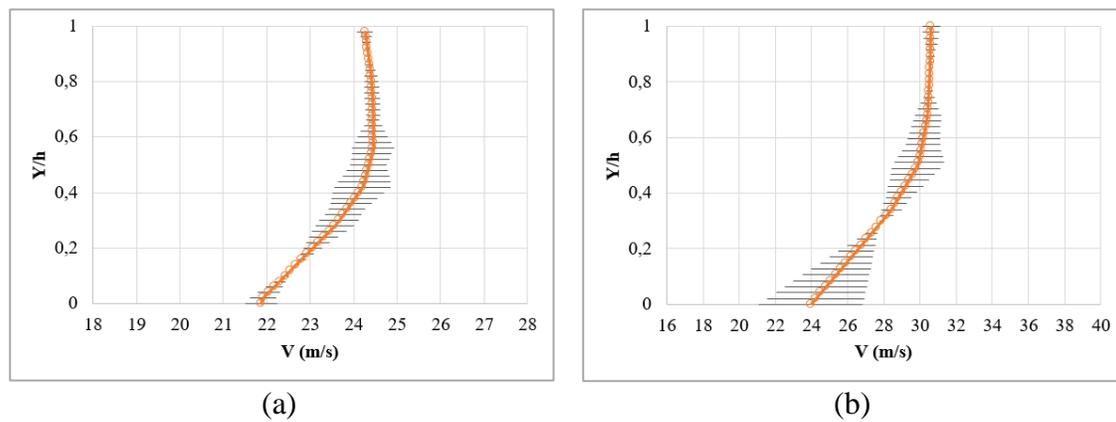


Figura 18: Perfis de velocidade em (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4 e (e) ponto 5 para as diferentes malhas analisadas.

A Figura 19 apresenta os perfis de velocidade para a malha com refinamento médio utilizando barras representativas da incerteza numérica devido a malha calculadas com o resultado do GCI (Equação 11) calculado para cada ponto. As velocidades estão relacionadas à posição do escoamento em cada ponto ( $Y$ ) com a profundidade da superfície livre no ponto considerado ( $h$ ).



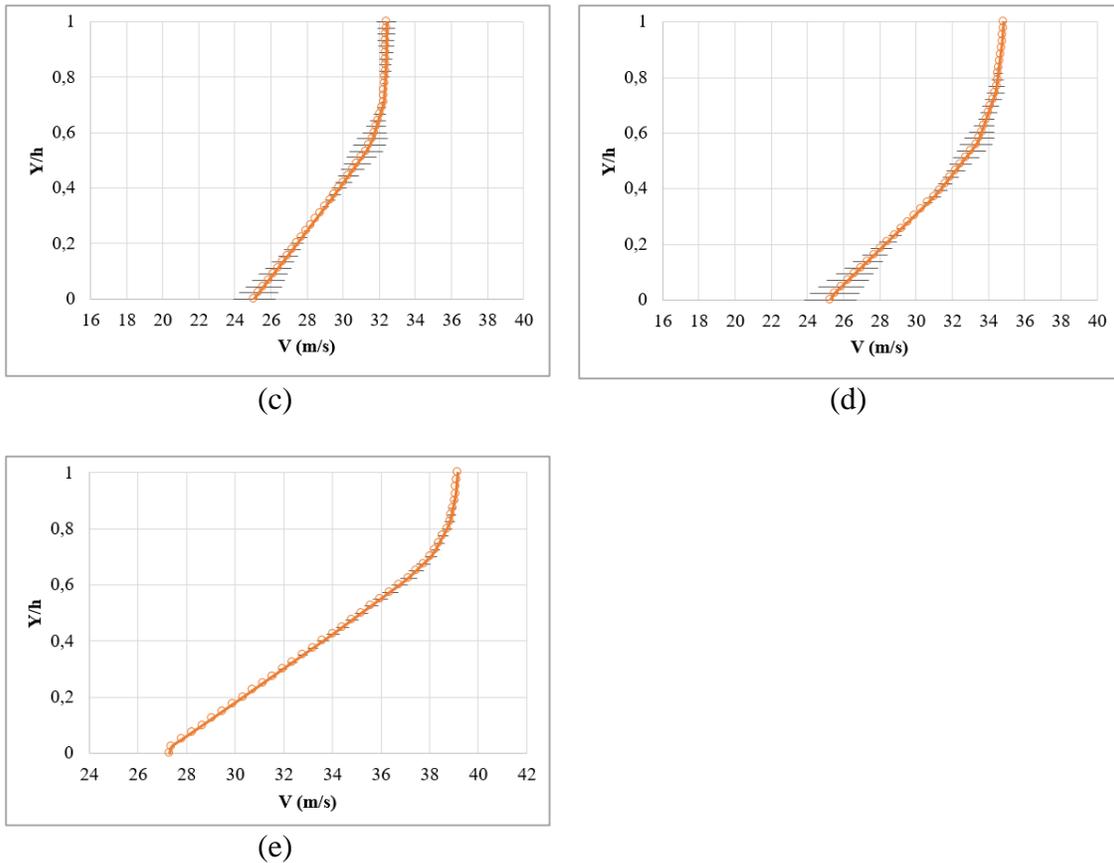


Figura 19: Perfis de velocidade em (a) ponto 1, (b) ponto 2, (c) ponto 3, (d) ponto 4 e (e) ponto 5 para a malha com médio grau de refinamento com as barras de erro devido à discretização.

No perfil de velocidade na região do ponto 1, a incerteza máxima de discretização foi de 2,69%, que corresponde a  $\pm 0,65$  m/s e o valor médio de 1,15%, que corresponde a 0,27 m/s. No ponto 2, a incerteza máxima de discretização foi de 12,06%, que corresponde a  $\pm 2,89$  m/s e o valor médio de 3,21%, que corresponde a 0,87 m/s. No ponto 3, a incerteza máxima de discretização foi de 4,65%, que corresponde a  $\pm 1,17$  m/s e o valor médio de 1,65%, que corresponde a 0,48 m/s. No ponto 4, a incerteza máxima de discretização foi de 5,71%, que corresponde a  $\pm 1,44$  m/s e o valor médio de 1,68%, que corresponde a 0,50 m/s. No ponto 5, a incerteza máxima de discretização foi de 0,94%, que corresponde a  $\pm 0,34$  m/s e o valor médio de 0,47%, que corresponde a 0,17 m/s.

O cálculo do GCI foi feito para avaliar a possibilidade de utilização da malha com refinamento médio. Assim, considerando que a média das incertezas representa um valor baixo, adotou-se a malha com refinamento médio como a malha das simulações. A comparação entre os perfis de velocidade para as diferentes malhas também foi analisado e foi considerado que não há variação significativa em grande parte dos pontos que compõe os perfis de velocidade.

## 5.2 SUPERFÍCIE LIVRE

A Figura 20 apresenta as frações de ar e água obtidas na simulação da vazão igual a 2089 m<sup>3</sup>/s. São apresentados os detalhes do escoamento na região da abertura da comporta, da região intermediária e final da calha. Na região final, o escoamento apresenta a forma típica de um jato. Para as outras vazões simuladas, o padrão do escoamento se repete. Conforme esperado, a profundidade do escoamento aumenta conforme o aumento da vazão. A Tabela 3 apresenta as profundidades do escoamento obtidas para as três vazões simuladas.

Tabela 3 - Profundidade do escoamento para as diferentes vazões simuladas.

Ponto	Profundidade do escoamento (m)		
	Q = 2089 m <sup>3</sup> /s	Q = 1684 m <sup>3</sup> /s	Q = 779 m <sup>3</sup> /s
1	1,07	0,88	0,36
2	0,90	0,73	0,32
3	0,84	0,67	0,31
4	0,80	0,66	0,31
5	0,74	0,64	0,29

As profundidades do escoamento foram obtidas considerando-se a posição em que os volumes de cálculo apresentavam fração de água igual a 0,5. Geralmente a superfície livre de escoamentos obtidos a partir de simulação numérica, utilizando o método VOF, é definida pela posição correspondente a fração de água igual a 0,5 (BOMBARDELLI *et al.*, 2011, TORO *et al.*, 2016).

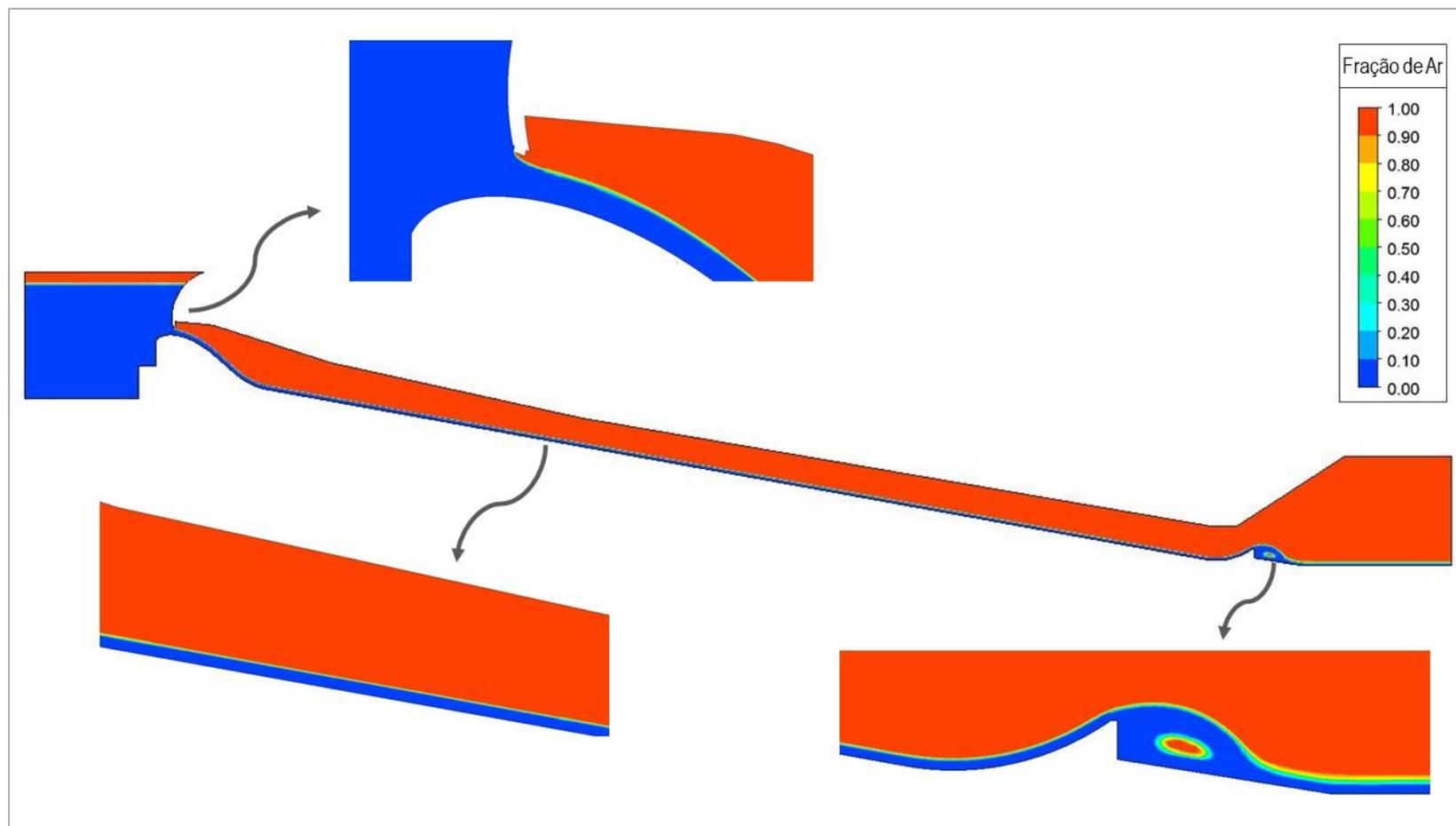


Figura 20 – Fração de ar-água para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .

### 5.3 VELOCIDADES

A partir das simulações numéricas, foram obtidos os perfis de velocidade de cada ponto. A Figura 21 e a Figura 22 apresentam os perfis de velocidade obtidos para as três vazões simuladas na região do ponto 2 e na região do ponto 3 na geometria sem a inserção de juntas. As velocidades estão relacionadas a posição do escoamento em cada ponto (Y) com a profundidade da superfície livre no ponto considerado (h).

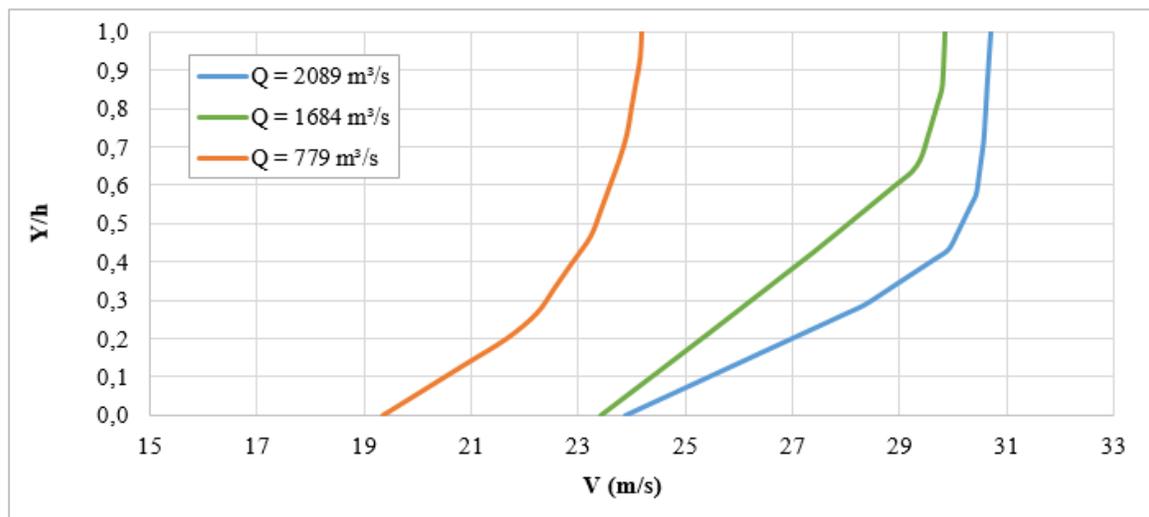


Figura 21 - Perfis de velocidade para diferentes vazões no ponto 2.

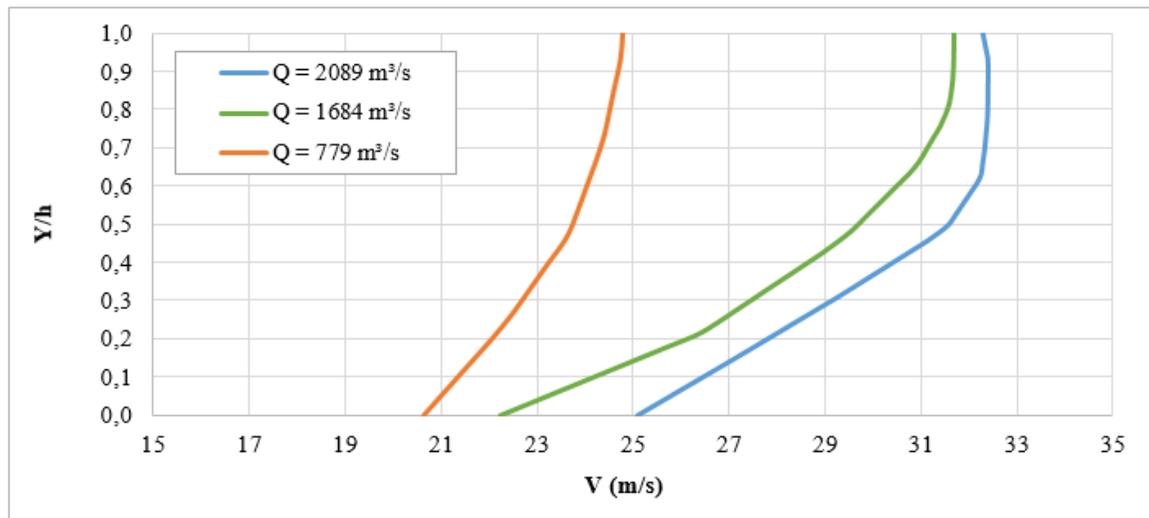


Figura 22 - Perfis de velocidade para diferentes vazões no ponto 3.

Observou-se que para um mesmo ponto, os perfis de velocidade indicam que o aumento da vazão resulta em maiores gradientes de velocidades, conforme era esperado. Também se observa o aumento da velocidade conforme o escoamento se desenvolve ao longo da calha, como pode ser verificado na Figura 23, que apresenta os perfis de velocidade nos cinco pontos ao longo da calha para a vazão de  $2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .

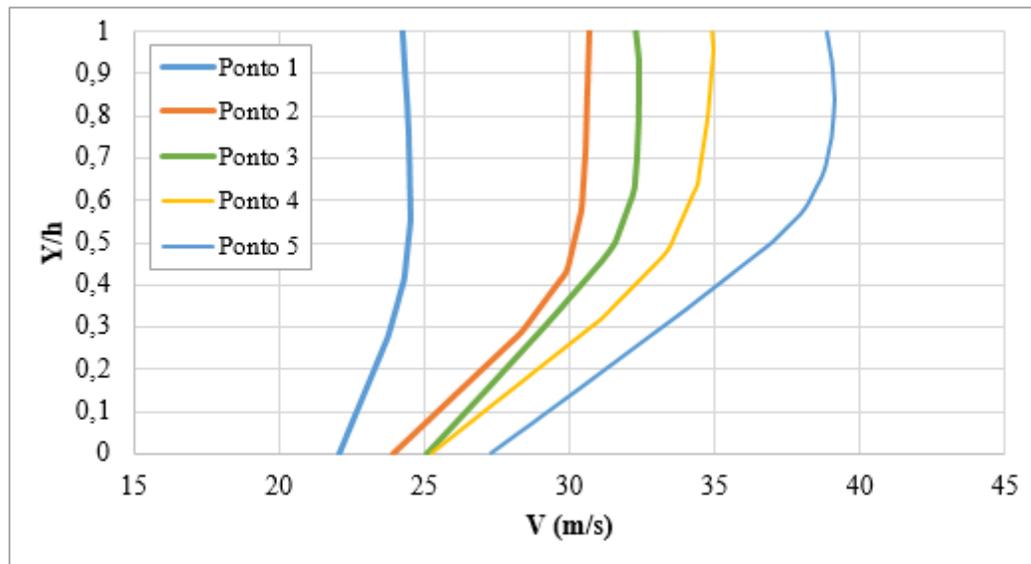


Figura 23 - Perfis de velocidade ao longo da calha sem juntas para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A Figura 24 apresenta os vetores velocidade do escoamento na geometria com a calha sem as juntas para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os vetores velocidade aumentam conforme o desenvolvimento do escoamento.

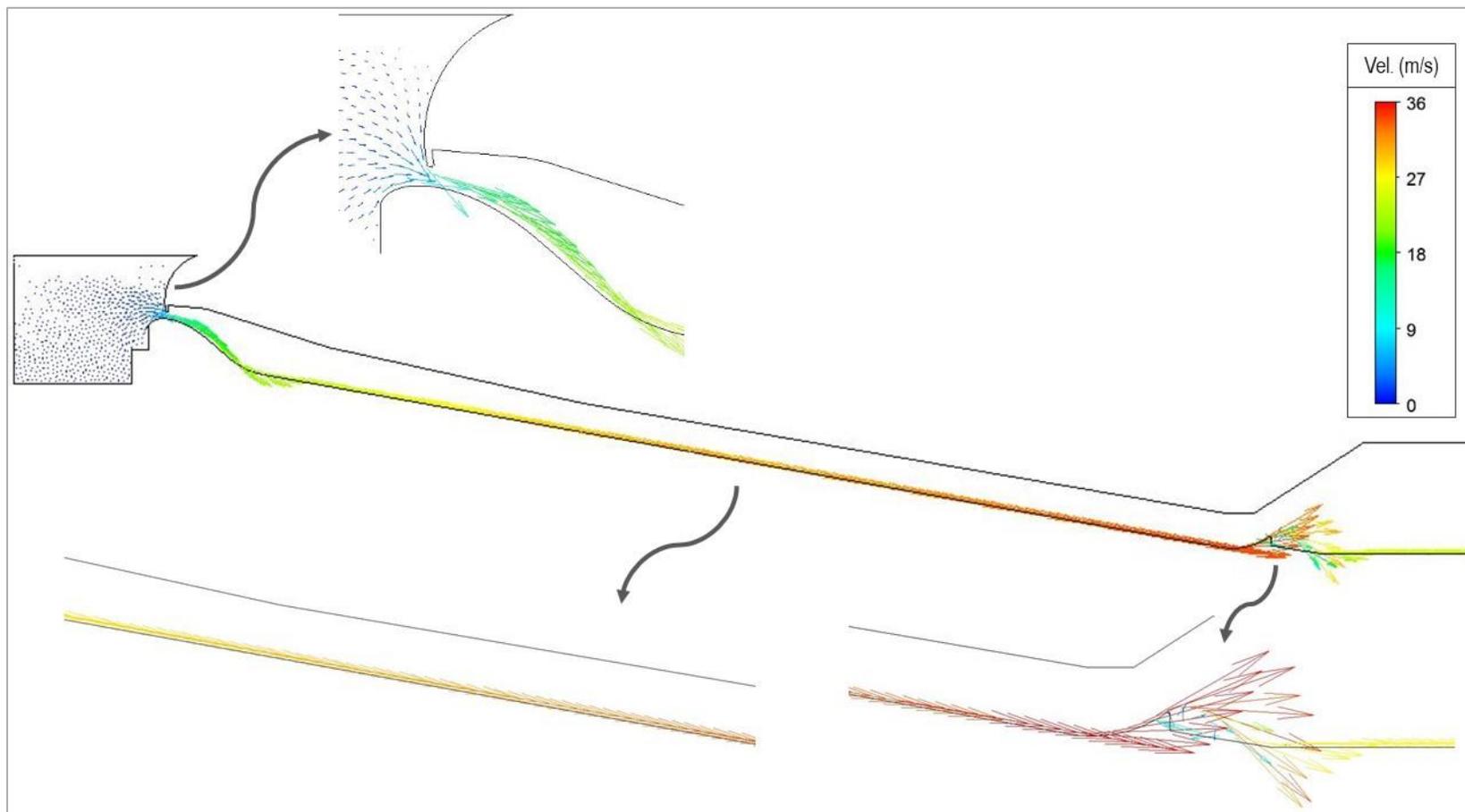


Figura 24 - Vetores velocidade para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  com destaque para a região da comporta, região central e final da calha.

Os perfis de velocidade podem ser descritos por uma lei de potência, como a apresentada na Equação 5. Os perfis obtidos numericamente para as três vazões foram aproximados por um perfil exponencial com expoente 1/10 ( $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ ), 1/12 ( $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e 1/15 ( $Q = 779 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A Figura 25 apresenta os valores obtidos com a Equação 5 e com o ajuste dos dados obtidos neste estudo para a vazão de  $779 \text{ m}^3/\text{s}$ .

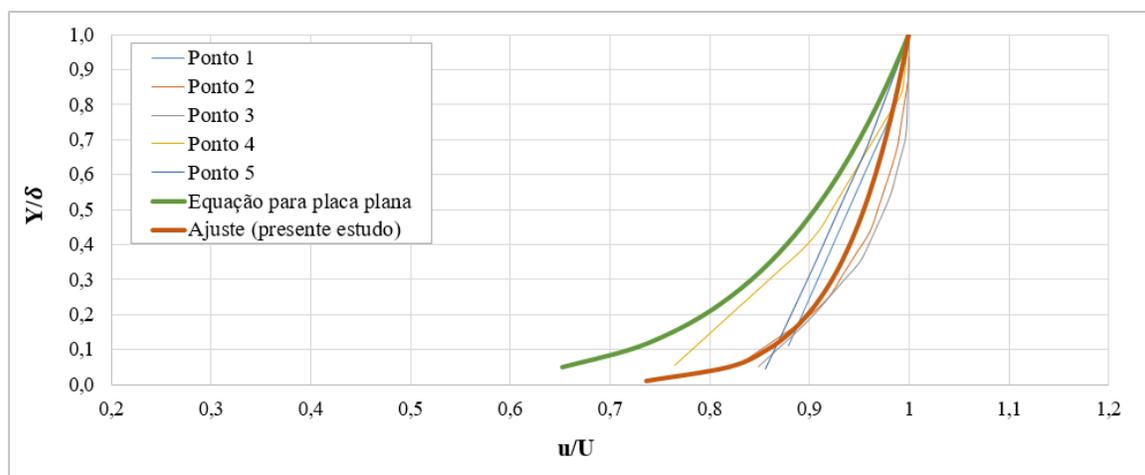


Figura 25 - Ajuste do perfil de velocidade para  $Q = 779 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Foram obtidos perfis de velocidade no vertedouro com a calha com a inserção das juntas de concretagem. Os pontos de obtenção dos perfis estão exemplificados na Figura 15. Analisando as velocidades obtidas na região das juntas, não é possível constatar alterações significativas nos valores.

Além dos perfis, foram verificados os campos de velocidade afim de analisar possíveis alterações a montante ou a jusante dos pontos onde foram obtidos os perfis. Como as juntas possuem dimensões muito pequenas em relação às dimensões do vertedouro, era esperado que esta singularidade não causasse alterações na velocidade do escoamento ao passar pela junta. A Figura 26 e a Figura 27 apresentam os perfis de velocidade na região do ponto 4 e do ponto 3 para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. São apresentados os perfis obtidos na região da junta e o perfil obtido na calha sem as juntas.

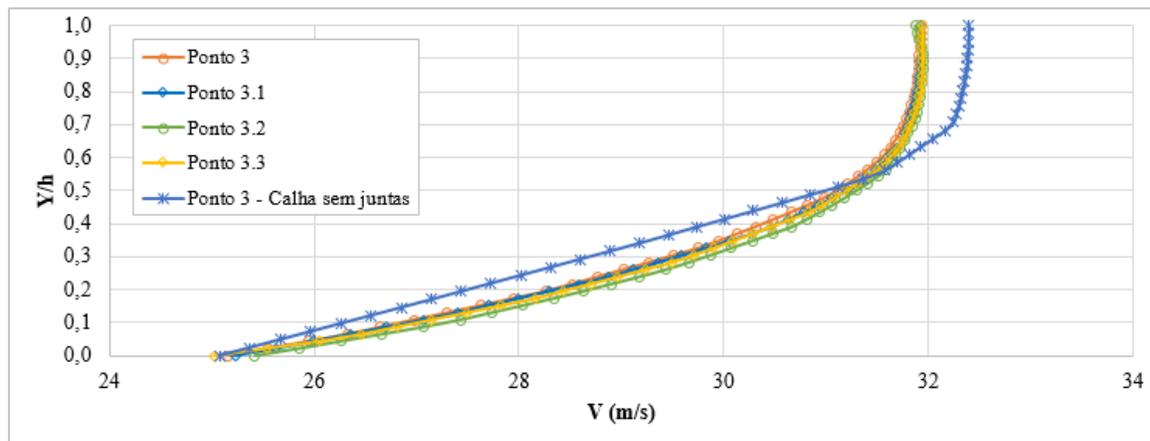


Figura 26 - Perfis de velocidade na região da junta para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  no ponto 3.

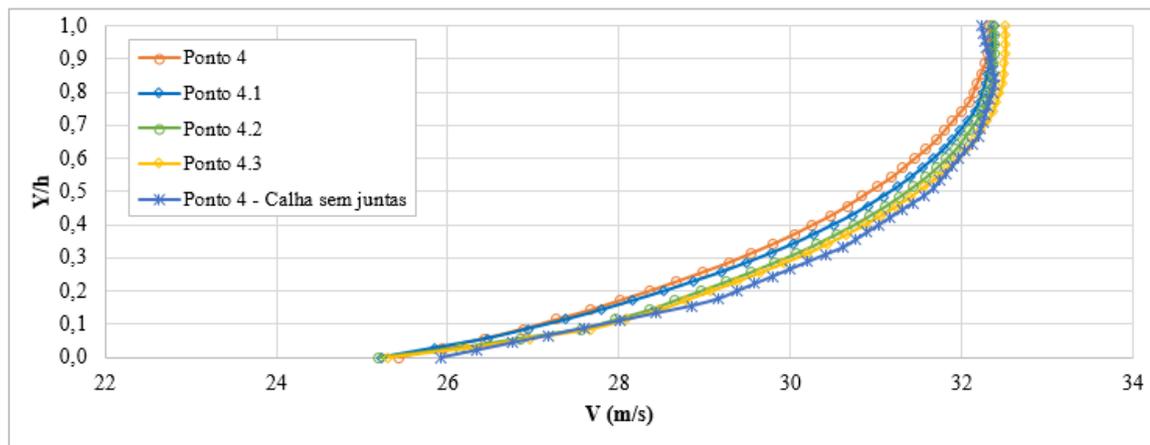


Figura 27 - Perfis de velocidade na região da junta para  $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$  no ponto 4.

Os perfis de velocidade obtidos para a geometria com a calha sem juntas foram comparados com os perfis de velocidade da calha com juntas de concretagem. Observou-se que não há variação significativa nas velocidades. As diferenças relativas máximas são de aproximadamente 4%, enquanto as diferenças relativas médias são de aproximadamente

1%. Estas diferenças podem estar relacionadas com o fato da malha ter um pouco mais de refinamento na região das juntas, alterando os valores de velocidade ao se comparar as duas geometrias. A Figura 28 e a Figura 29 apresentam a comparação entre os perfis de velocidade das duas geometrias para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ .

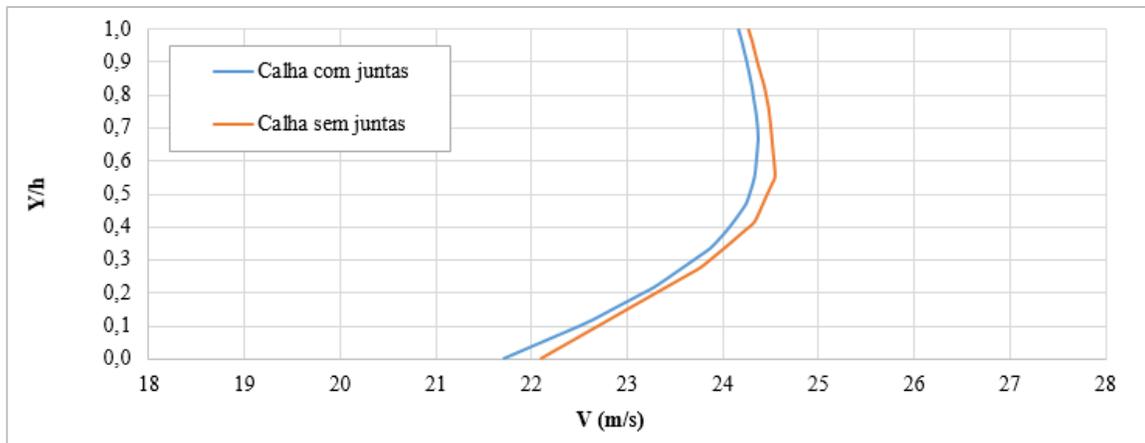


Figura 28 – Perfis de velocidade para as duas geometrias na região do ponto 1 para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .

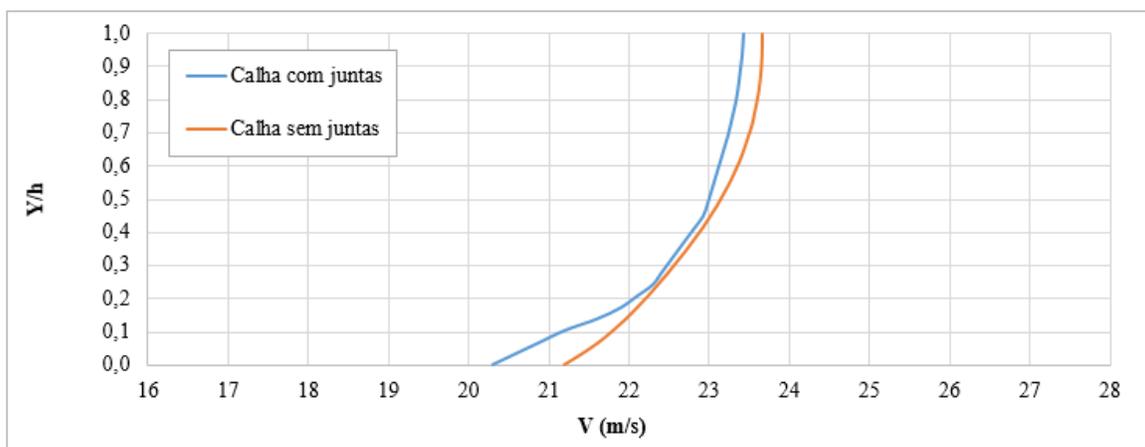


Figura 29 - Perfis de velocidade para as duas geometrias na região do ponto 1 para  $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ .

## 5.4 PRESSÕES

As pressões totais na calha do vertedouro foram obtidas numericamente na região dos pontos de análise. Observa-se o aumento desta variável com o aumento da vazão. Analisando os pontos 1, 2, 3 e 4 nota-se que a pressão diminui com o desenvolvimento do escoamento. No ponto 5 há o aumento da pressão, este fato pode estar relacionado com a proximidade do final da calha e não estar sendo bem representado. A Figura 30 apresenta as pressões nos pontos para as três vazões simuladas.

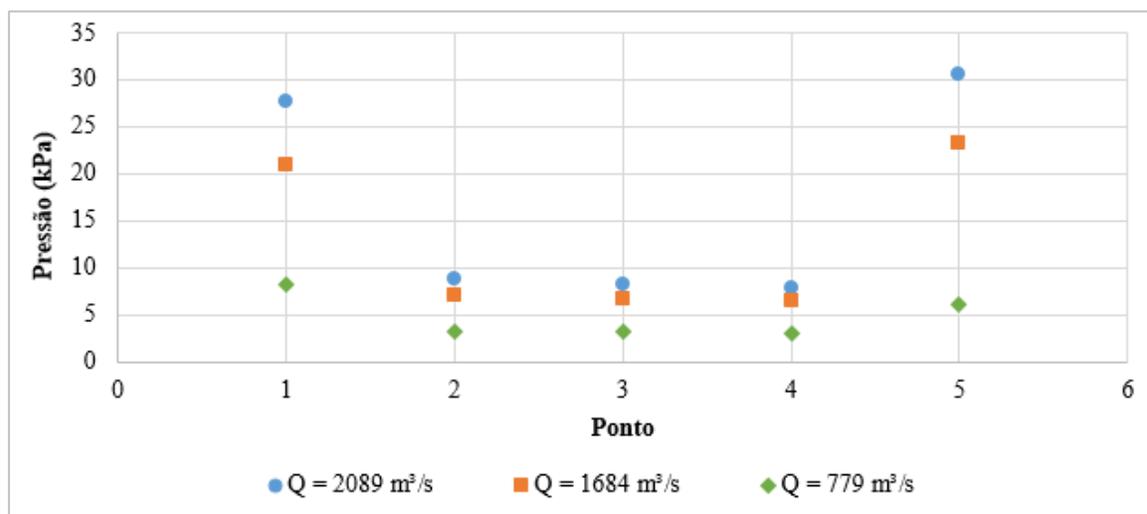


Figura 30 – Pressões no vertedouro com calha sem juntas para diferentes vazões.

Os valores de pressão obtidos na calha sem juntas foram comparados com os valores de pressão na calha com as juntas de concretagem. A comparação se deu no ponto do vértice de montante da junta. Observou-se que a inserção das juntas provoca regiões de pressões negativas próximas aos pontos 2, 3 e 4. Esta alteração foi observada nas três vazões simuladas e está apresentada na Figura 31, na Figura 32 e na Figura 33.

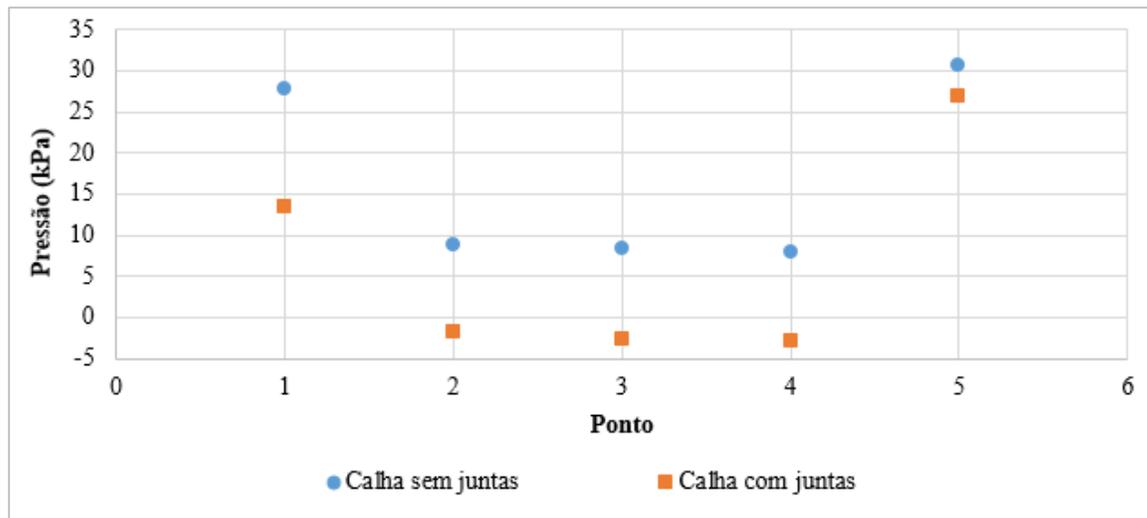


Figura 31 - Comparação entre pressões das duas geometrias para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .

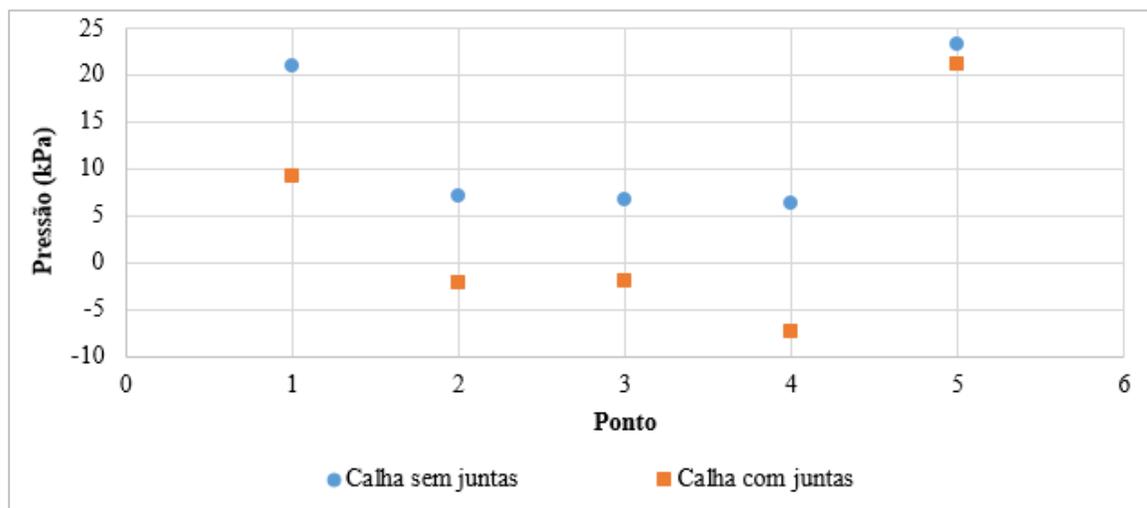


Figura 32 - Comparação entre pressões das duas geometrias para  $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ .

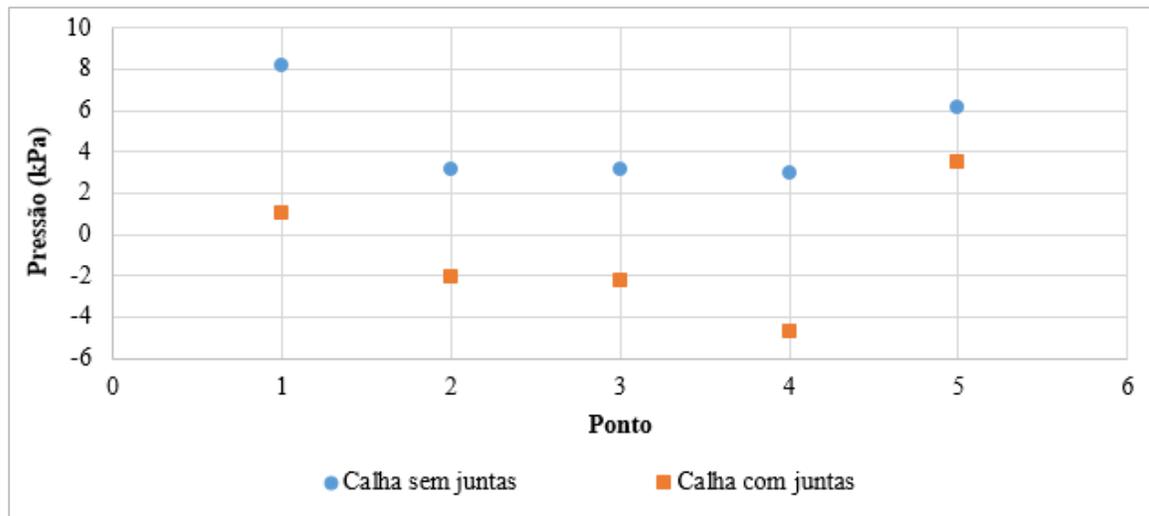


Figura 33 - Comparação entre pressões das duas geometrias para  $Q = 779 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Na geometria com a calha sem juntas, a ocorrência de pressões negativas esteve restrita à região próxima à comporta e na parte final da calha, conforme a Figura 34, que apresenta o campo de pressões do escoamento para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  na região final da calha do vertedouro. A Figura 35 apresenta o campo de pressões com detalhe na região da junta onde é possível observar a ocorrência de pressões negativas na face de montante da junta e também em uma região próxima a jusante da junta.

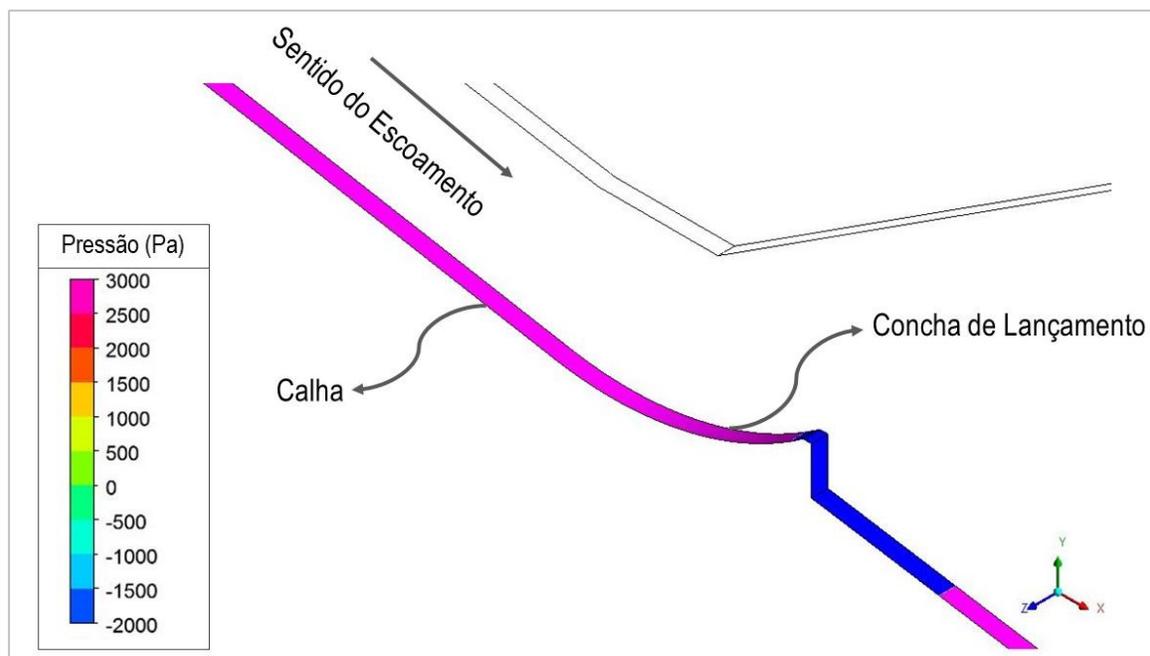


Figura 34 - Pressões na região mais a jusante da calha (geometria sem juntas) para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$ .

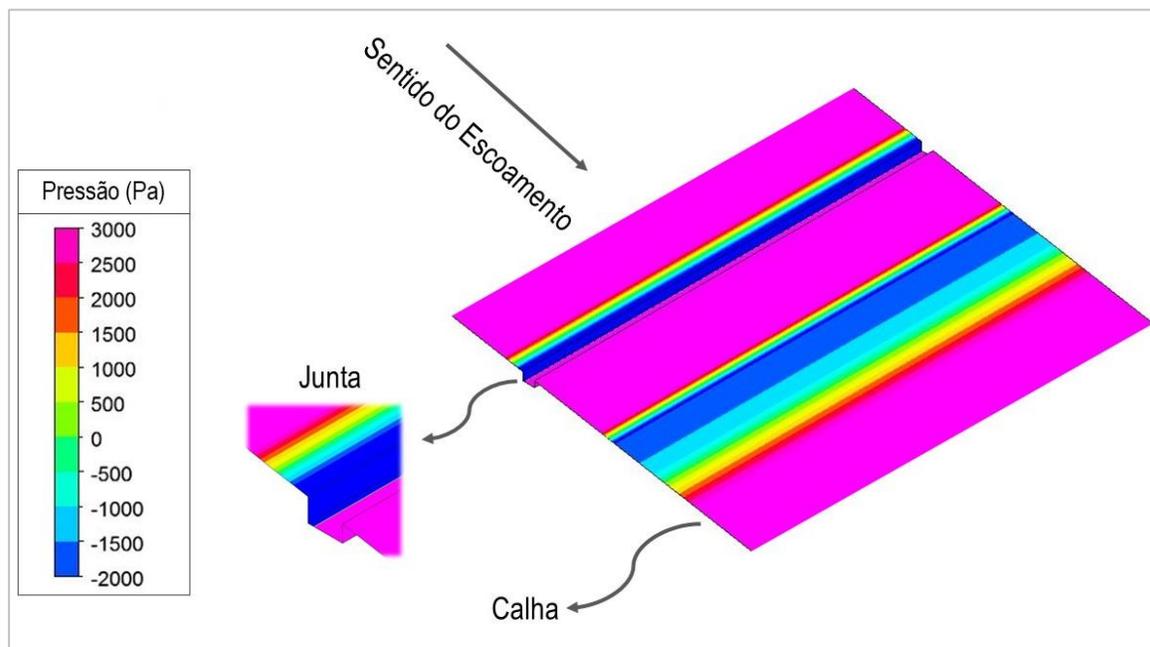


Figura 35 - Pressão na região do ponto 4 para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  e geometria com juntas na calha.

A verificação das pressões é importante devido à possibilidade de ocorrer cavitação para determinados valores de pressões negativas. A Tabela 4 e a Tabela 5 apresentam os índices de cavitação calculados ao longo da calha para as vazões simuladas. Os resultados também podem ser vistos na Figura 36. Na calha com as juntas, os valores foram calculados junto ao vértice de montante da junta.

Tabela 4 - Índice de cavitação calculado para os pontos do vertedouro com calha sem juntas.

Ponto	Índice de Cavitação ( $\sigma$ )		
	Q = 2089 m <sup>3</sup> /s	Q = 1684 m <sup>3</sup> /s	Q = 779 m <sup>3</sup> /s
1	0,44	0,46	0,54
2	0,26	0,28	0,40
3	0,23	0,26	0,38
4	0,21	0,23	0,34
5	0,21	0,24	0,33

Tabela 5 - Índice de cavitação calculado para os pontos do vertedouro com calha com junta.

Ponto	Índice de Cavitação ( $\sigma$ )		
	Q = 2089 m <sup>3</sup> /s	Q = 1684 m <sup>3</sup> /s	Q = 779 m <sup>3</sup> /s
1	0,39	0,42	0,50
2	0,23	0,25	0,38
3	0,20	0,24	0,36
4	0,19	0,20	0,31
5	0,20	0,23	0,32

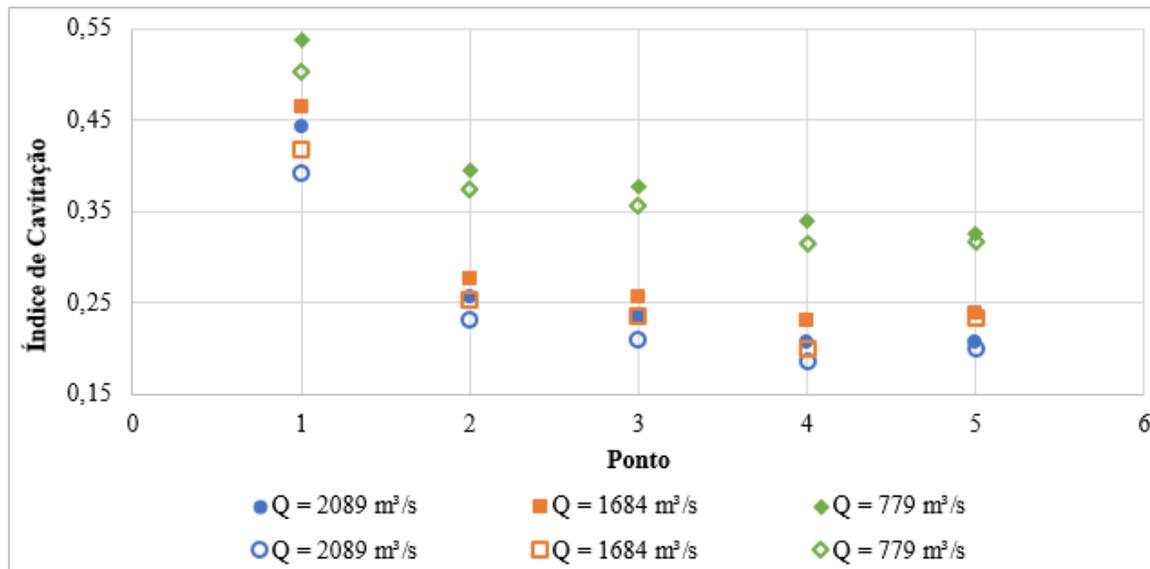


Figura 36 –Índice de cavitação para as vazões simuladas. Os pontos sem preenchimento correspondem aos resultados para a calha com juntas.

Os escoamentos analisados possuem índice de cavitação maior que o considerado por Falvey (1990) ( $\sigma_i = 0,20$ ) na maior parte dos pontos analisados. Os pontos que possuem  $\sigma \leq 0,20$  estão localizados nos pontos 3, 4 e 5 para  $Q = 2089 \text{ m}^3/\text{s}$  e no ponto 4 para  $Q = 1684 \text{ m}^3/\text{s}$ . As vistorias realizadas no vertedouro da UHE Furnas indicam que os maiores danos se encontram no segmento mais a jusante da calha.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho teve como objetivo a avaliação da utilização de simulações numéricas para analisar o escoamento sobre vertedouros salto esqui. A metodologia aplicada se mostrou qualificada para a possibilidade de representação do escoamento.

Entretanto, é importante que o modelo numérico utilizado neste trabalho passe por ajustes. Por exemplo, é necessária a geração de uma malha computacional mais refinada (com elementos menores) na região das juntas de concretagem. Além disso, os resultados devem ser comparados com dados experimentais para que sejam feitos ajustes ao modelo para a sua calibração, como a rugosidade da calha.

Os perfis de velocidade obtidos numericamente apresentam uma distribuição típica do perfil de velocidades ao longo da profundidade deste tipo de escoamento. Um perfil exponencial de velocidades com expoentes  $1/10$ ,  $1/12$  e  $1/15$  descreve este tipo de escoamento, enquanto escoamentos sobre placa plana são descritos por perfis exponenciais com coeficiente  $1/7$ . A comparação de velocidade entre a calha sem juntas e calha com juntas mostra que não há variação significativa na velocidade com a inserção das juntas.

Já para pressão, nota-se o aparecimento de pressões negativas junto ao vértice das juntas. Foram calculados os índices de cavitação, que indicaram regiões com maior possibilidade de haver cavitação.

Para trabalhos futuros também recomenda-se a simulação de uma geometria contendo outras singularidades além das juntas de concretagem. Assim, poderiam ser simulados os efeitos de imperfeições ou erosões ao longo da calha do vertedouro. Também recomenda-se a análise de tensões de cisalhamento nos locais de maior dano na superfície da calha.

## 7 REFERÊNCIAS

ANA, Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico -. **Relatório de Segurança de Barragens**. Brasília: [s. n.], 2020.

ANSYS. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. Canonsburg, PA: Ansys, Inc., 2011.

ARANTES, Eudes José. **CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO SOBRE VERTEDOUROS EM DEGRAUS VIA CFD**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Civil na Área de Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

BOMBARDELLI, F. A.; MEIRELES, I.; MATOS, J. Simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. **Environmental Fluid Mechanics**, p.263–288, 2011.

BORJA, João Gerda de. **Considerações sobre dissipação de energia a jusante de vertedouros salto esqui**. 322 f. 2012. Tese de Doutorado - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

CELIK, Ismail B. *et al.* Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. **Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME**, [s. l.], v. 130, n. 7, p. 0780011–0780014, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/1.2960953>

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.

CHEN, Q.; DAI, G.; LIU, H. Volume of Fluid for Turbulence Numerical Simulation of Stepped Spillway Overflow. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 128, n 7, p. 683-688, 2002.

CHOW, Ven te. **Open-Channel Hydraulics**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1959.

FALVEY, Henry T. **Cavitation in Chutes and Spillways**. Denver, Colorado: [s. n.], 1990.

FARIAS, Luciana dos Anjos *et al.* UHE FURNAS: ANÁLISE E VISÃO GERAL DOS REFORÇOS E REPAROS DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO APÓS 20 ANOS. *In:* , 2019, Salvador. **XXXII - Seminário Nacional de Grandes Barragens - SNGB**. Salvador: [s. n.], 2019.

FUSCO, Péricles Brasiliense; ONISHI, Minoru. **Introdução à Engenharia de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Cengage Learning, 2017. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788522127771>

GADGE, Prajakta P.; BHAJANTRI, M. R.; BHOSEKAR, V. V. Experimental investigations for Telengiri dam spillway, irrigation project, Odisha—A case study. **ISH Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 00, n. 00, p. 1–8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09715010.2018.1503974>

GRAHAM, James R. *et al.* **Erosion of Concrete in Hydraulic Structures**. [S. l.]: ACI Committee 210, 1998.

HELLER, Valentin *et al.* Ski Jump Hydraulics. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 131, n. 5, p. 347–355, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/ASCE0733-94292005131:5347>

KERMANI, E. Fadaei; BARANI, G. A.; GHAEINI-HESSAROEYEH, M. Investigation of cavitation damage levels on spillways. **World Applied Sciences Journal**, [s. l.], v. 21, n. 1, p. 73–78, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.5829/idosi.wasj.2013.21.1.2630>

KIRKGOZ, Mehmet Salih; AKOZ, Mevlut Sami; ONER, Ahmet Alper. Numerical modeling of flow over a chute spillway. **Journal of Hydraulic Research**, [s. l.], v. 47, n. 6, p. 790–797, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.3826/jhr.2009.3467>

KORMANN, Aline Christiane Morales. **Estudo do desempenho de quatro tipos de materiais para reparo a serem utilizados em superfícies erodidas de concreto de barragens**. 213 f. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

LAURIA, Agostino; ALFONSI, Giancarlo. Numerical Investigation of Ski Jump Hydraulics. **Journal of Hydraulic Engineering**, [s. l.], v. 146, n. 4, p. 1–8, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001718](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001718)

LEÃO, João Pedro Torrinha Martins. **Caracterização de patologias e metodologias de reparação em estruturas hidráulicas em betão armado do tipo descarga de fundo**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017.

LIU, Yu-Wen; YEN, Tsong; HSU, Tsao-Hua. Abrasion erosion of concrete by water-borne sand. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 36, n. 10, p. 1814–1820, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.03.018>

MACINNIS, Cameron. **Guide for Making a Condition Survey of Concrete in Service**. [S. l.]: ACI Committee 2010, 1992.

MALISKA, Clovis R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: GEN/LTC, 2004.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. *E-book*.

TASSINARI, Lucas Camargo da Silva *et al.* Combination of experimental and numerical approaches to determine the main characteristics of skimming flow in stepped spillways. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n 3, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190070>.

TORO, J. P.; BOMBARDELLI, F. A.; PAIK, J.; MEIRELES, I.; AMADOR, A. (2016). "Characterization of turbulence statistics on the non- aerated skimming flow over stepped spillways: a numerical study", **Environmental Fluid Mechanics**, 16 (6), 1195–1221.

TORTORELLO, Fernando Ismael; SOBRINHO, Carlos de Alencar Dias; ANDRADE, Walton Pacelli. Reforços e Reparos em Estruturas de Concreto da UHE de Furnas. *In:* , 2001, Fortaleza. **XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens**. Fortaleza: [s. n.], 2001.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. **Hydraulic Design of Spillways**, 1990.

VON FAY, Kurt F. **Guide to Concrete Repair**. [S. l.]: U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, 2015.

WAN, Wuyi; LIU, Bin; RAZA, Awais. Numerical Prediction and Risk Analysis of Hydraulic Cavitation Damage in a High-Speed-Flow Spillway. **Shock and Vibration**, [s. l.], v. 2018, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2018/1817307>

WHITE, Frank M. **Mecânica dos Fluidos**. [S. l.]: McGraw-Hill, 2002.