ANTONIO BRAULIO NETO

**ESTUDO ANALÍTICO, EXPERIMENTAL E NUMÉRICO *CFD* DO ESCOAMENTO
TRANSITÓRIO NO CIRCUITO DE ADUÇÃO SIMPLES COM CHAMINÉ DE
EQUILÍBRIO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – PCH**

São Paulo
2019

ANTONIO BRAULIO NETO

**ESTUDO ANALÍTICO, EXPERIMENTAL E NUMÉRICO *CFD* DO ESCOAMENTO
TRANSITÓRIO NO CIRCUITO DE ADUÇÃO SIMPLES COM CHAMINÉ DE
EQUILÍBRIO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – PCH**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Orientador: Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz.

São Paulo

2019

ANTONIO BRAULIO NETO

**ESTUDO ANALÍTICO, EXPERIMENTAL E NUMÉRICO *CFD* DO ESCOAMENTO
TRANSITÓRIO NO CIRCUITO DE ADUÇÃO SIMPLES COM CHAMINÉ DE
EQUILÍBRIO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS – PCH**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de Concentração: Engenharia
Mecânica de Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz.

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Braulio Neto, Antonio

Estudo analítico, experimental e numérico cfd do escoamento transitório no circuito de adução simples com chaminé de equilíbrio de pequenas centrais hidrelétricas - pch / A. Braulio Neto – versão corr. -- São Paulo, 2019.
125 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Mecânica dos fluídos computacional 2.Transientes hidráulicos
3.Pequena central hidrelétrica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Dedico este trabalho a todos que me apoiaram para a sua conclusão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz por conduzir o desenvolvimento e estimular a conclusão deste trabalho.

Aos meus pais Francisco Braulio e Dirce Mudo Alves Braulio pelo contínuo incentivo para o meu crescimento profissional e por todos os conselhos dados para o meu crescimento pessoal.

Aos meus irmãos Arydna, Hector e Hegles pelo apoio, conselhos e confiança depositada em mim.

Aos amigos e companheiros Flavio Ricardo Ribeiro e Eng. Camillo de Vasconcellos Machado pelo incansável incentivo.

Ao Prof. Podalyro Amaral de Souza e ao CTH - Centro Tecnológico de Hidráulica EPUSP pela orientação e viabilização dos procedimentos experimentais.

Aos demais familiares e amigos pela paciência e compreensão nos momentos que não pude estar presente.

E, por fim, agradeço ao Departamento de Engenharia Mecânica e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) pela oportunidade concedida.

“A persistência é o caminho do êxito.”

Charles Chaplin

RESUMO

O transiente hidráulico na adução de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) é um importante tema de estudo para a correta escolha e dimensionamento das estruturas de amortecimento, que protegem o circuito adutor da variação abrupta da pressão interna causada pela variação na velocidade média do escoamento. Este trabalho propõe a utilização da hidrodinâmica computacional (*CFD*) para avaliar a oscilação de massa ou nível d'água no interior da estrutura de proteção denominada Chaminé de Equilíbrio e comparar esses resultados com a solução teórica analítica, com os critérios de dimensionamento definidos em norma técnica e com os dados de medições experimentais. O problema foi modelado no *software* Ansys CFX que utiliza o método dos volumes finitos (MVF) para resolver os campos de velocidade e pressão do escoamento, tanto em regime permanente, quanto em regime transiente. Aplicando-se o modelo *CFD* proposto ao circuito hidráulico didático, os resultados foram validados com a formulação teórica e com as medições experimentais do nível d'água na chaminé. O modelo foi aplicado num estudo de caso que consiste num circuito hidráulico de PCH. Os resultados da oscilação de massa no interior da chaminé para este estudo de caso confirmam o emprego da fluidodinâmica computacional para avaliar tais escoamentos em regime transitório.

Palavras-chave: chaminé de equilíbrio, transiente hidráulico, *CFD*, PCH.

ABSTRACT

The hydraulic transient in the circuit of Small Hydroelectric Power Plants (SHP) is an important study subject for the correct choice and design of damping structure which protects the conduit from an abrupt variation of the internal pressure caused by the changes in the average flow velocity. This work proposes the use of computational fluid dynamics (CFD) to evaluate the mass oscillation or water level inside the protection structure called Surge Tank and compares these results with theory, design criteria defined by the technical standard, and experimental data. The problem was modeling in Ansys CFX software that uses the finite volume method (FVM) to solve velocity and pressure flow fields, in both steady state and transient flow. The proposed model used in a hydraulic circuit led to results validation with experimental measurements of water level surge tank. For the proposed case study, the response of the numerical CFD simulation confirms the use of computational fluid dynamics to evaluate such transient flows.

Keywords: surge tank, hydraulic transient, CFD, SHP

LISTA DE FIGURAS:

Figura 01	– Arranjo em planta da UHE Santo Osório.	15
Figura 02	– Arranjo em elevação da UHE Salto Osório.	17
Figura 03	– Arranjo esquemático de central hidrelétrica com chaminé de equilíbrio.	17
Figura 04	– PCH Caveiras: circuito adutor com chaminé de equilíbrio.	18
Figura 05	– Diagrama esquemático de circuito adutor do tipo simples com chaminé de equilíbrio.	19
Figura 06	– Fenômenos oscilatórios causados pelo fechamento instantâneo da válvula de controle: golpe de aríete (à esquerda) e oscilação de nível d'água em vasos comunicantes (à direita).	20
Figura 07	– Diagrama esquemático do circuito adutor simples com chaminé de equilíbrio simples para modelagem matemática.	21
Figura 08	– Instalações da Chaminé de Equilíbrio Didática CTH / EPUSP – vista do trecho a montante do circuito hidráulico.	45
Figura 09	– Chaminé de Equilíbrio Didática CTH / EPUSP – detalhe do trecho final do circuito hidráulico.	46
Figura 10	– Desenho esquemático do aparato experimental da Chaminé de Equilíbrio Didática CTH / EPUSP	47
Figura 11	– Modelo 3D do circuito hidráulico didático com indicação das seções de entrada (<i>A inlet</i>) e de saída (<i>C outlet</i>) e da abertura superior da Chaminé de Equilíbrio (<i>B opening</i>)	53
Figura 12	– Detalhe da malha do volume de controle do circuito hidráulico didático	54
Figura 13	– Características Geométricas Principais e Nível d'Água do Reservatório para o Circuito Hidráulico adotado no estudo de caso	57
Figura 14	– Geometria utilizada na modelagem 3D do circuito hidráulico com indicação das seções de entrada de adução (<i>A inlet</i>), da abertura superior da Chaminé de Equilíbrio (<i>B opening</i>) e de saída do conduto (<i>C outlet</i>)	62

Figura 15	–	Malha de discretização do volume de controle do estudo de caso	63
Figura 16	–	(M1) Nível d'Água na Chaminé $z(m)$ - Método de Pressel. .	67
Figura 17	–	(M2) Nível d'Água na Chaminé $z(m)$ - Método de Pressel ..	67
Figura 18	–	(M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)	69
Figura 19	–	Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações).	70
Figura 20	–	(M1) Evolução do balanço de massa de água e ar (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)	71
Figura 21	–	(M1) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente	72
Figura 22	–	(M1) Nível d'Água na Chaminé $Y (m)$ da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica de água = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=30$ s	73
Figura 23	–	(M2) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente	73
Figura 24	–	(M2) Nível d'Água na Chaminé $Y (m)$ da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica de água = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=30$ s	74
Figura 25	–	(Caso 1) Nível d'Água na Chaminé $z(m)$ - Método de Pressel.	77
Figura 26	–	(Caso 2) Nível d'Água na Chaminé $z(m)$ - Método de Pressel.	77
Figura 27	–	(Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações).	79

Figura 28	– (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de $k - \varepsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações).	80
Figura 29	– (Caso 1) Evolução do balanço de massa de água (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)	81
Figura 30	– (Caso 1) Evolução do balanço de massa de água (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)	82
Figura 31	– (Caso 1) Nível d'Água na Chaminé Y (m) da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica da água = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=60s$	83
Figura 32	– (Caso 2) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente	83
Figura 33	– (Caso 2) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície <i>IsoSurface</i> com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente	84

LISTA DE TABELAS:

Tabela 01	–	Determinação do coeficiente C_{min} em função de k	40
Tabela 02	–	Chaminé de equilíbrio didática CTH / EPUSP – resumo dos dados.	47
Tabela 03	–	Medição experimental M1 da chaminé de equilíbrio didática CTH / EPUSP.	49
Tabela 04	–	Medição experimental M2 da chaminé de equilíbrio didática CTH / EPUSP.	49
Tabela 05	–	Medições M1 e M2: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir dos dados experimentais.	50
Tabela 06	–	Medições M1 e M2: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da formulação teórica.	51
Tabela 07	–	Medições M1 e M2: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da norma NBR12596.	51
Tabela 08	–	Resumo da malha do modelo 3D do circuito hidráulico didático.	54
Tabela 09	–	Qualidade da malha <i>software</i> Ansys CFX do modelo 3D do circuito hidráulico didático.	55
Tabela 10	–	Chaminé de equilíbrio do estudo de caso – resumo dos dados	58
Tabela 11	–	Estudo de caso – dados do escoamento	59
Tabela 12	–	Casos 01 e 02: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da formulação teórica.	60
Tabela 13	–	Casos 01 e 02: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da norma NBR12596.	61
Tabela 14	–	Resumo da Malha - número total dos elementos.	63
Tabela 15	–	Qualidade da malha <i>software</i> Ansys CFX do modelo 3D do estudo de caso.	64

Tabela 16	–	(M1) Quadro resumo com resultados: Teoria, NBR12596, Experimental, Numérico (1D) e CFD (3D).	75
Tabela 17	–	(M2) Quadro resumo com resultados: Teoria, NBR12596, Experimental, Numérico (1D) e CFD (3D).	75
Tabela 18	–	(Caso 1) Quadro resumo com resultados: Teoria, NBR12596, Numérico (1D) e CFD (3D)	85
Tabela 19	–	(Caso 2) Quadro resumo com resultados: Teoria, NBR12596, Numérico e CFD.	85

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CTH	Centro Tecnológico de Hidráulica
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
MVF	Método dos Volumes Finitos
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
RMS	<i>Root Mean Square</i>
USP	Universidade de São Paulo
SHP	<i>Small Hydroelectric Power Plant</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. GERAL.....	12
1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS.....	13
1.3. JUSTIFICATIVA.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS	15
2.2. O TRANSITÓRIO HIDRÁULICO NO CIRCUITO SIMPLES COM CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO	18
2.2.1. Geral	18
2.2.2. Modelagem Matemática (1D) da Oscilação de Massa na Chaminé de Equilíbrio	20
2.2.3. Solução Analítica para o Nível d'Água na Chaminé de Equilíbrio na Condição de Fechamento Instantâneo da Válvula de Controle	24
2.2.4. Método de Pressel Aplicado à Oscilação de Massa na Chaminé de Equilíbrio	26
2.3. O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)	27
2.3.1. Geral	27
2.3.2. Modelo de turbulência	31
2.3.3. Parâmetro adimensional y^+	35
2.4. O DIMENSIONAMENTO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SEGUNDO DIRETRIZES ESTABELECIDAS EM NORMA TÉCNICA.....	36
2.4.1. Geral	36
2.4.2. Necessidade de Instalação da Chaminé de Equilíbrio	37
2.4.3. Dimensionamento Hidráulico da Chaminé de Equilíbrio	38
3. METODOLOGIA E DEFINIÇÕES DOS MODELOS.....	42
3.1. GERAL.....	42
3.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIDÁTICA – LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA – CTH / EPUSP	44
3.2.1. Geral	44
3.2.2. Procedimento Experimental	47
3.2.3. Caracterização hidráulica do escoamento a partir dos dados experimentais.....	49

3.2.4. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo a Formulação Teórica e a Norma Técnica Brasileira NBR12596	50
3.2.5. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo o Método de Diferenças Finitas (Método de Pressel)	52
3.2.6. Fluidodinâmica Computacional – Configuração do Pré-processamento ..	52
3.3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESTUDO DE CASO	57
3.3.1. Definição da Geometria do Estudo de Caso	57
3.3.2. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo a Formulação Teórica e Norma Técnica Brasileira NBR12596	58
3.3.3. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo o Método de Diferenças Finitas (Pressel)	61
3.3.4. Fluidodinâmica Computacional – Configuração do Pré-processamento ..	61
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1. GERAL.....	66
4.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIDÁTICA – CTH / EPUSP.....	66
4.2.1. Dados Experimentais, Solução Analítica e aplicação das Diretrizes apresentadas na norma NBR12596.....	66
4.2.2. Método de Pressel aplicado ao Circuito Hidráulico Didático	67
4.2.3. Fluidodinâmica Computacional Aplicada ao Circuito Hidráulico Didático ..	68
4.2.4. Comparação dos Resultados Analítico, Experimental e Numérico	74
4.3. CIRCUITO HIDRÁULICO DO ESTUDO DE CASO	76
4.3.1. Solução Analítica e aplicação das Diretrizes apresentadas na norma NBR12596.....	76
4.3.2. Método de Pressel Aplicado ao Estudo de Caso	76
4.3.3. Fluidodinâmica Computacional Aplicada ao Estudo de Caso	78
4.3.4. Comparação dos Resultados Analítico e Numérico	84
5. CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS.....	89
APÊNDICE A – MONITORES DO SOLVER ANSYS CFX.....	92

1. INTRODUÇÃO

1.1. GERAL

No Brasil, as Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) são aproveitamentos hidrelétricos de potência instalada entre 3 MW e 30 MW, com área alagada máxima do reservatório de 13 km². Em geral, a escolha por tais empreendimentos deve-se à sua viabilidade ambiental e econômica, uma vez que existe legislação específica para sua outorga e licenciamento (ANEEL, 2015).

No desenvolvimento do projeto de centrais hidrelétricas, que pode ser realizado conforme ELETROBRAS (2000), o estudo dos transitórios ou transientes hidráulicos faz-se necessário para o correto dimensionamento das estruturas hidráulicas sujeitas às variações de pressão ou golpe de aríete, a fim de se eliminar os riscos de acidentes operacionais que podem comprometer a geração de energia elétrica ou causar perdas de vidas humanas.

A instalação da estrutura denominada Chaminé de Equilíbrio na adução de uma PCH é uma alternativa economicamente viável para amortecer os efeitos do golpe de aríete, fenômeno causado pela rápida variação da velocidade média do escoamento no circuito adutor. A Chaminé de Equilíbrio, quando corretamente dimensionada, possibilita amortecer rapidamente as oscilações de nível na chaminé, bem como proporcionar valores limites de máximo e mínimo das amplitudes de oscilação que se mantenham dentro da mesma (SCHREIBER, 1977).

O dimensionamento de tal estrutura pode ser realizado segundo a Norma Técnica Brasileira NBR12596 (ABNT, 1992), cujos critérios estão baseados na teoria analítica de escoamentos transitório unidimensional (1D) apresentada em Jaeger (1977), Chaudhry (2014) e Wylie e Streeter (1993).

Atualmente, a área da *Computational Fluid Dynamics* (CFD) e os avanços na capacidade de processamento (*softwares* e *hardwares*) permitem a aplicação de modelos tridimensionais (3D) em conjunto com técnicas numéricas para resolver o sistema de equações que governam o escoamento de fluidos em regimes permanentes e transitórios, fornecendo os campos de pressão e velocidade para os instantes de interesse.

Em contrapartida à teoria analítica 1D, o estudo do escoamento na adução de PCH pode ser realizado por meio de códigos, pacotes ou softwares de CFD, no caso deste trabalho o pacote Ansys CFX, que utiliza a modelagem tridimensional (3D) empregando a técnica de volumes finitos (MVF) para discretizar e resolver o domínio fluídico (ANSYS, 2013d).

Este trabalho tem como objetivo comparar os resultados dos níveis de oscilação de massa na Chaminé de Equilíbrio fornecidos pelo emprego da norma técnica ABNT (1992) com aqueles fornecidos pela utilização do software Ansys CFX para o modelo tridimensional proposto de PCH, considerando o escoamento transitório, oscilatório e amortecido, causado pelo fechamento instantâneo de válvula de controle.

1.2. OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o projeto e dimensionamento de um circuito de geração simples de pequenas centrais hidrelétricas (PCH's), no que diz respeito à oscilação do nível d'água no interior do dispositivo de proteção denominado Chaminé de Equilíbrio para o escoamento transiente causado pelo fechamento instantâneo de válvula a jusante. O estudo visa obter os valores de oscilação de massa ou nível d'água na chaminé a partir de modelagem 3D, utilizando-se técnica de Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamic CFD*) com o emprego da licença acadêmica do *software* comercial Ansys CFX.

Os objetivos específicos deste trabalho estão listados abaixo e referem-se principalmente à capacidade de modelagem do problema com a ferramenta proposta e a respectiva validação do modelo:

- Modelar o problema de oscilação de massa num circuito simples com chaminé de equilíbrio utilizando as ferramentas da Fluidodinâmica Computacional;
- Validar o modelo de simulação *CFD* com medições de nível d'água em experimento de chaminé de equilíbrio realizado em laboratório de hidráulica;
- Comparar os resultados do modelo computacional proposto para a simulação numérica do nível d'água em chaminé de equilíbrio de PCH's com os valores

obtidos empregando-se os procedimentos definidos pela Norma Técnica Brasileira NBR 12596 (ABNT, 1992).

1.3. JUSTIFICATIVA

A partir das informações apresentadas nos itens anteriores, a necessidade de aumento da demanda de energia nas próximas décadas e a preocupação mundial com as questões relacionadas aos impactos ambientais e sustentabilidade, torna-se necessário o investimento em pesquisa para um melhor aproveitamento e aperfeiçoamento das tecnologias empregadas na geração de energia elétrica.

A energia hidráulica é a energia renovável abundante no território brasileiro. A sua utilização para geração de energia elétrica pode ser realizada por meio de PCH's, objeto de estudo deste trabalho.

Uma das causas de acidentes nestes empreendimentos está relacionada ao mau dimensionamento e avaliação das sobre pressões que os órgãos adutores estão sujeitos.

A experiência do autor na elaboração de projetos de engenharia no setor de PCH's foi determinante na definição do tema e na escolha do estudo de caso. A definição da geometria, juntamente com as características hidráulicas adotadas, traduz o atual cenário dos empreendimentos hidrelétricos disponíveis, onde prevalecem os barramentos de baixa queda constituídos por um circuito hidráulico do tipo simples com chaminé de equilíbrio.

A utilização da Fluidodinâmica Computacional através do *software* Ansys CFX para modelagem do problema é justificada pelo escasso número de trabalhos na literatura que apresenta a simulação em volumes finitos (MVF) de chaminés de equilíbrio em aproveitamentos hidrelétricos.

Dessa forma, este trabalho justifica-se para melhorar a confiabilidade na operação de tais empreendimentos hidrelétricos (PCH's).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

As pequenas centrais hidrelétricas (PCH) são atualmente definidas conforme a resolução normativa nº 673, de 04 de Agosto de 2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, como aproveitamentos hidrelétricos com potência instalada entre 3 a 30 MW com uma área de inundação do reservatório inferior a 13 km², excluindo a calha do leito regular do rio.

O arranjo de um circuito hidráulico comumente encontrado está apresentado nas Figuras 01, 02 e 03. Nelas estão identificadas as principais estruturas hidráulicas que fazem parte deste tipo de aproveitamento hidrelétrico.

Figura 01 – Arranjo em planta da UHE Salto Osório

Fonte: Andrzejewski (2009).

Um circuito hidráulico típico proposto neste estudo é constituído pelos seguintes elementos ou estruturas (SCHREIBER, 1977 e SOUZA; SANTOS; BORTONI, 2009). A numeração dos itens apresentada abaixo se refere aos elementos apresentados na Figura 03:

1. Barragem: a barragem associada a uma usina hidrelétrica possui as seguintes finalidades: concentração de água para produzir queda, criação de

reservatório de regularização ou levantamento do nível para possibilitar a entrada d'água num circuito de adução. São classificadas, segundo o material de construção, em barragens de terra, de enrocamento, de concreto ou do tipo misto.

2. Tomada D'Água: estrutura responsável pela captação d'água a partir do reservatório e o seu direcionamento para o conduto ou galeria pressurizada. Geralmente possui grades na entrada para impedir a entrada de objetos, que podem danificar as pás das turbinas, e comportas para isolar o circuito no caso de manutenção com a parada da máquina.
3. Túneis/Conduto/Galeria de baixa pressão: elementos que interligam a saída da Tomada D'Água à chaminé de equilíbrio. Operam com pequenas pressões e não estão sujeitos aos golpes de aríete.
4. Chaminé de equilíbrio: órgão responsável pelo amortecimento das oscilações/transientes hidráulicos necessário para a regulação da máquina. Também é responsável por diminuir o golpe de aríete na parada e fornecer o volume de água necessário na partida da máquina.

A ABNT (1992) define a Chaminé de equilíbrio como: “estrutura hidráulica, de concreto ou aço, geralmente implantada entre o trecho de adução de pequena declividade (menor pressão) e o trecho de adução de grande declividade (maior pressão), com a finalidade de amortecer transientes hidráulicos produzidos por manobras rápidas do dispositivo de controle de vazão da turbina”.

5. Conduto Forçado/Galeria/Túneis de alta pressão: elementos que interligam a saída da Chaminé de equilíbrio à Casa de Força, operam com alta pressão e estão sujeitos aos golpes de aríete na manobra de válvulas e parada da máquina.
6. Casa de Força: estrutura que abriga as unidades geradoras, constituídas por turbinas e geradores, e as válvulas borboletas que são os dispositivos de proteção hidráulica.
7. Canal de Fuga: estrutura responsável pela restituição ou devolução da água ao leito do rio.

Figura 02 – Arranjo em elevação da UHE Salto Osório

Fonte: Andrzejewski (2009).

Figura 03 – Arranjo esquemático de central hidrelétrica com chaminé de equilíbrio

Fonte: Souza, Fuchs e Santos (1983).

A Figura 04 apresenta ilustração com um exemplo típico de PCH que utiliza uma chaminé de equilíbrio a céu aberto. Esta estrutura hidráulica de proteção pode ser independente para cada unidade geradora ou pode atuar na proteção contra variação de pressão interna do circuito de duas ou mais turbinas simultaneamente.

Figura 04 – PCH Caveiras: circuito adutor com chaminé de equilíbrio

Fonte: ELETROBRAS (2000).

2.2. O TRANSITÓRIO HIDRÁULICO NO CIRCUITO SIMPLES COM CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO

2.2.1. Geral

O fenômeno denominado transitório hidráulico está associado à oscilação de pressão no interior do circuito hidráulico adutor de um aproveitamento hidrelétrico, por exemplo. Essa variação de pressão é causada pela variação da vazão de água turbinada ou vazão de engolimento que passa através das turbinas.

A Figura 05, que representa esquematicamente um circuito adutor do tipo simples com chaminé de equilíbrio, será utilizada para uma análise qualitativa dos efeitos da variação da vazão turbinada que passa pelo conduto. Os números indicados na figura representam os seguintes elementos:

- (1) Reservatório
- (2) Conduto adutor (de baixa pressão)
- (3) Conduto forçado (de alta pressão)
- (4) Chaminé de equilíbrio
- (5) Dispositivo ou válvula de controle de vazão
- (m_1) Manômetro instalado no início do conduto forçado
- (m_2) Manômetro instalado no fim do conduto forçado

Em geral, o conduto adutor (de baixa pressão) não é projetado para resistir às grandes variações de pressão interna, ao contrário do que ocorre com o conduto forçado (de alta pressão).

A garantia para que as pressões que atuam no conduto forçado não se propaguem para o conduto adutor são dadas pela instalação de um dispositivo de proteção na interligação entre ambos. No caso da Figura 05, o dispositivo de proteção apresentado denomina-se chaminé de equilíbrio. Além dessa proteção ao conduto adutor, a sua instalação também produz um segundo efeito, que pode ser descrito como o amortecimento e redução da oscilação de pressão no conduto forçado (JAEGER, 1977).

Figura 05 – Diagrama esquemático de circuito adutor do tipo simples com chaminé de equilíbrio

Fonte: Jaeger (1977).

Os valores de pressão indicados pelos manômetros m_1 e m_2 , logo após o fechamento instantâneo da válvula de controle, fornecem informações sobre o comportamento de dois fenômenos oscilatórios sobrepostos existentes.

O manômetro m_1 registra a oscilação do nível d'água da superfície livre na chaminé de equilíbrio, enquanto que o manômetro m_2 registra o comportamento da sobreposição da oscilação de dois fenômenos distintos. Uma primeira oscilação de curto período, da ordem de segundos e uma segunda oscilação de período mais longo, sendo esta última idêntica àquela registrada pelo manômetro m_1 .

A onda de curto período, denominada “onda de pressão” ou “golpe de aríete”, propaga-se pelo fluido no interior do conduto forçado com rápido amortecimento. A velocidade de propagação ou celeridade “ a ” dessa onda depende de características

do fluido e do conduto forçado. O seu período de oscilação é dado por “ $T = 2L/a$ ” para um conduto forçado de comprimento “ L ”.

A Figura 06 apresenta a representação física dos dois fenômenos de oscilação de pressão que o conduto forçado está sujeito. O golpe de aríete está indicado na figura à esquerda por uma onda de pressão, enquanto que o fenômeno oscilatório do nível d’água na chaminé de equilíbrio está representado pela oscilação do nível em vasos comunicantes (z_1 e z_2) na figura à direita.

Figura 06 – Fenômenos oscilatórios causados pelo fechamento instantâneo de válvula: golpe de aríete (à esquerda) e oscilação de nível d’água em vasos comunicantes (à direita)

Fonte: Jaeger (1977).

Conforme apresentado acima, o transitório hidráulico pode ser dividido em dois fenômenos oscilatórios de diferentes naturezas. O estudo de cada um desses fenômenos pode ser feito separadamente e consiste numa modelagem matemática própria do fenômeno.

O presente trabalho considera avaliar, comparar e discutir os efeitos do fenômeno oscilatório do nível d’água da superfície livre na chaminé de equilíbrio e, portanto, não entrará no mérito de avaliar os efeitos da propagação da onda de pressão ou golpe de aríete no conduto forçado.

2.2.2. Modelagem Matemática (1D) da Oscilação de Massa na Chaminé de Equilíbrio

O desenvolvimento das equações que regem o fenômeno de Oscilação de Massa ou Nível d’Água na Chaminé de equilíbrio pode ser encontrado em textos que são referência neste assunto, tais como Jaeger (1977), Chaudhry (2014) e Wylie e Streeter (1993).

Este tópico adota a notação apresentada em Jaeger (1977) para desenvolver a modelagem matemática do problema. A simbologia utilizada para as variáveis ou grandezas físicas, com suas respectivas unidades de medida, está listada a seguir.

As principais variáveis ou grandezas físicas que determinam o fenômeno oscilatório estão apresentadas no diagrama esquemático de circuito adutor simples com chaminé de equilíbrio simples (Figura 07).

Figura 07 – Diagrama esquemático do circuito adutor simples com chaminé de equilíbrio simples para modelagem matemática

Fonte: Jaeger (1977).

Símbolo	Descrição	Unidade
H	Queda bruta ou carga total na válvula, diferença entre o nível d'água do reservatório e a elevação na saída (válvula de controle)	m
H_0	Diferença entre o nível d'água na chaminé e a elevação na saída (válvula de controle)	m

Símbolo	Descrição	Unidade
H_i	Carga total na entrada do conduto adutor, diferença entre o nível d'água no reservatório e a elevação da linha de centro na entrada do conduto	m
H_a	Carga total na entrada da chaminé de equilíbrio, diferença entre o nível d'água do reservatório e a elevação da linha de centro do conduto na entrada da chaminé	m
D_T	Diâmetro interno do conduto adutor	m
D_S	Diâmetro interno da chaminé de equilíbrio	m
A_T	Área da seção transversal do conduto adutor (de baixa pressão) entre o reservatório e a chaminé	m ²
L	Comprimento do conduto adutor (de baixa pressão), trecho entre o reservatório e a chaminé	m
A_S	Área da seção transversal da chaminé de equilíbrio	m ²
A_{TH}	Área da Thoma (ver item 2.4.3)	m ²
A_p	Área da seção transversal do conduto forçado (de alta pressão), trecho entre a chaminé e a saída (válvula de controle)	m ²
v	Velocidade média do escoamento no conduto adutor, adotada positiva para escoamentos com o sentido do reservatório para a chaminé	m/s
$A_T.v$	Vazão de água ou descarga no conduto adutor	m ³ /s
$A_T.v_0$	Vazão de água ou descarga no conduto adutor no instante inicial t_0 , escoamento em regime permanente	m ³ /s
Q	Vazão instantânea de água na saída ou válvula de controle	m ³ /s
Q_0	Vazão de água na saída ou válvula de controle no instante inicial t_0 , escoamento em regime permanente	m ³ /s
F	Coeficiente de perda de carga total no conduto adutor	s ² /m
$\pm F.v^2$	Perda de carga no conduto adutor, positivo para $v > 0$	m

Símbolo	Descrição	Unidade
$F.v_0^2$	Perda de carga no conduto adutor no instante inicial t_0 , escoamento em regime permanente	m
z	Elevação do nível d'água na chaminé de equilíbrio acima do nível d'água do reservatório	m
$z_0 = -F.v_0^2$	Elevação do nível d'água na chaminé de equilíbrio no instante inicial t_0 , escoamento em regime permanente	m
$z_{\max}(z_1)$	Elevação máxima do nível d'água na chaminé de equilíbrio (ver item 2.4.3)	m
$z_{\min}(z_2)$	Elevação mínima do nível d'água na chaminé de equilíbrio (ver item 2.4.3)	m
t	Tempo	s
g	Aceleração da gravidade (adotado = 9,81)	m/s ²
ρ	Massa específica da água (adotado = 997)	kg/m ³
$u = \frac{dz}{dt}$	Velocidade vertical no nível d'água na chaminé de equilíbrio, adotada positivo no sentido para cima	m
$T = 2\pi \sqrt{\frac{L \cdot A_s}{g \cdot A_T}}$	Período da oscilação de massa na chaminé de equilíbrio, desprezando os efeitos de atrito no conduto	m
$z_* = v_0 \sqrt{\frac{L \cdot A_T}{g \cdot A_s}}$	Amplitude da oscilação de massa na chaminé de equilíbrio no fechamento instantâneo da válvula de controle, desprezando os efeitos de atrito no conduto	m

Aplicando-se o balanço de forças num elemento infinitesimal do conduto adutor de comprimento “ dL ” e após a integração dessa equação diferencial ao longo de todo o conduto adutor de comprimento “ L ”, obtém-se a Equação 01. O sinal do terceiro termo é adotado positivo, quando o escoamento tem o sentido do reservatório para a válvula de controle, e é adotado negativo no caso contrário.

A Equação 02 resulta da aplicação da relação de Conservação de Massa no volume de controle definido pelos três elementos: conduto adutor, chaminé de equilíbrio e conduto forçado.

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} + z \pm Fv^2 + \frac{v^2}{2g} = 0 \quad (01)$$

$$v \cdot A_T = A_S \frac{dz}{dt} + Q \quad (02)$$

O sistema formado pelas Equações 01 e 02 considera as seguintes simplificações para o seu desenvolvimento:

- A chaminé de equilíbrio é do tipo simples com seção transversal constante;
- As paredes do conduto forçado são consideradas rígidas (inelástica);
- Considera-se a água como fluido incompressível;
- A inércia da massa de água interna a chaminé de equilíbrio é desprezada.

2.2.3. Solução Analítica para o Nível d'Água na Chaminé de Equilíbrio na Condição de Fechamento Instantâneo da Válvula de Controle

O sistema de equação (Equações 01 e 02) fornece solução analítica por integração direta para alguns casos específicos de condição de contorno.

Este trabalho considera a condição de fechamento instantâneo ou abrupto da válvula de controle e, nesta condição, o sistema de equação fornece como solução as Equações 03 a 10:

$$v = \frac{A_S}{A_T} \cdot \frac{dz}{dt} \quad (03)$$

ou

$$\frac{dv}{dt} = \frac{A_S}{A_T} \cdot \frac{d^2z}{dt^2} \quad (04)$$

Desprezando-se os efeitos de perda de carga por atrito no conduto adutor ($F = 0$), tem-se:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dv}{dt} + z = 0 \quad (05)$$

ou

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{A_s}{A_T} \cdot \frac{d^2 z}{dz^2} + z = 0 \quad (06)$$

Fornecendo como solução para as variáveis que caracterizam o fenômeno, o conjunto das Equações 07 a 10:

$$z = z_* \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (07)$$

$$v = v_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{T} t\right) \quad (08)$$

$$z_* = v_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{A_T}{A_s}} \quad (09)$$

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{A_s}{A_T}} \quad (10)$$

Com a inclusão do termo referente à perda de carga por atrito no conduto adutor ($F > 0$), a solução analítica do sistema de equação por integração direta faz-se possível para a condição de fechamento abrupto da válvula de controle, onde a seguinte relação pode ser determinada:

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = \frac{L A_T}{2g A_s} \cdot \frac{v_0^2}{(F v_0^2)^2} - \frac{z}{F v_0^2} + C e^{-z(2g A_s F v_0^2)/(L A_T v_0^2)} \quad (11a)$$

ou

$$\left(\frac{v}{v_0}\right)^2 = -\frac{z}{F v_0^2} + \frac{L A_T v_0^2}{2g A_s (F v_0^2)^2} \left[1 - e^{-(2g A_s F v_0^2)(z + F v_0^2)/(L A_T v_0^2)}\right] \quad (11b)$$

A constante de integração “ C ” da Equação 11a foi definida substituindo-se (v , z) pelos seus respectivos valores na condição inicial (v_0 , z_0). O primeiro máximo “ z_1 ” pode ser determinado a partir dessa equação atribuindo $v = 0$ m/s.

Para os demais valores extremos de “ z ”, a constante de integração “ C ” deve ser determinada considerando as respectivas condições iniciais (v , z) e o sentido do escoamento no conduto adutor.

2.2.4. Método de Pressel Aplicado à Oscilação de Massa na Chaminé de Equilíbrio

O Método de Pressel (JAEGER, 1977) substitui as equações diferenciais, Equações 01 e 02, por equações de diferenças finitas, onde o intervalo infinitesimal de tempo é substituído por um intervalo pequeno e finito de tempo que permite a integração passo-a-passo do novo sistema dado pelas Equações 12 e 13.

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} + z_m \pm F v_m^2 = 0 \quad (12)$$

ou

$$v_m \cdot A_{Tm} = Q_m + A_{Sm} \frac{\Delta z}{\Delta t} \quad (13)$$

onde:

$t_{i+1} = t_i + \Delta t$, representa a discretização no tempo;

$A_{Sm} = \frac{1}{2}(A_{Si} + A_{Si+1})$, refere-se à seção transversal média da chaminé;

$A_{Tm} = \frac{1}{2}(A_{Ti} + A_{Ti+1})$, corresponde a seção média do conduto adutor;

$z_m = z_i + \frac{1}{2} \Delta z$;

$v_m = v_i + \frac{1}{2} \Delta v$;

$Q_m = \frac{1}{2}(Q_i + Q_{i+1})$.

Nas equações acima, os termos que apresentam o índice subscrito “m” referem-se ao seu valor médio no intervalo de tempo, dado pela média aritmética dos valores calculados para os instantes nos extremos desse intervalo.

Para um circuito hidráulico composto por um conduto adutor com valor de área da seção transversal constante, os incrementos no nível d'água na chaminé de equilíbrio “ Δz ” e na velocidade de subida da superfície livre “ Δv ” são diretamente determinados pela combinação das Equações 12 e 13, que resulta em:

$$\Delta z = \frac{A_T}{A_{S_m}} v_i \Delta t + \frac{A_T}{2A_{S_m}} \Delta v \Delta t - \frac{Q_m}{A_{S_m}} \Delta t \quad (14)$$

$$a (\Delta v)^2 + b (\Delta v) + c = 0 \quad (15)$$

onde os coeficientes da equação de segundo grau acima são definidos por:

$$a = \pm \frac{1}{4} F \quad (16)$$

$$b = \frac{L}{g \Delta t} + \frac{A_T \Delta t}{4 A_{S_m}} \pm F v_i \quad (17)$$

$$c = z_i + \frac{A_T}{2 A_{S_m}} v_i \Delta t - \frac{Q_m}{2 A_{S_m}} \Delta t \pm F v_i^2 \quad (18)$$

2.3. O MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS (MVF)

2.3.1. Geral

Os conceitos básicos do escoamento de fluidos envolvem a aplicação das Leis de Conservação da Física de uma propriedade extensiva para certa quantidade de matéria, denominada Sistema. Entretanto, para escoamento de fluidos o conceito de Volume de Controle ou uma região definida no espaço é utilizado para definir as equações que governam e caracterizam o movimento das partículas do fluido. Esta abordagem aplica as Leis de Conservação de uma propriedade intensiva para equacionar o problema (FERZIGER; PERIC, 2002 e VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

As equações que governam o escoamento de fluidos são traduções em linguagem matemática das seguintes sentenças aplicadas a um elemento infinitesimal do fluido que respeita as propriedades do contínuo:

- A massa do fluido é conservada;
- A taxa de variação da quantidade de movimento é igual a resultante das forças que atuam no elemento (Segunda Lei de Newton);
- A taxa de variação da energia total é igual soma da taxa de calor transferida para o elemento e a taxa de trabalho realizado pela partícula de fluido. (Primeira Lei da Termodinâmica).

A modelagem matemática das Leis Básicas de Conservação da Física enunciadas conduzem a um sistema de equações diferenciais parciais que fornece solução quando do emprego de hipóteses simplificadoras e da definição de equações auxiliares que traduzem as condições de fronteira ou de contorno e as condições iniciais, para escoamento em regime não permanente.

Técnicas definidas por métodos numéricos são utilizados para resolver o escoamento de fluidos com a determinação de suas principais propriedades, tais como, massa específica, pressão, velocidade e energia, numa dada posição dentro do volume de controle para um dado instante no tempo.

Códigos numéricos ou *softwares* que empregam as técnicas da fluidodinâmica computacional para resolver o escoamento são baseados em três etapas ou elementos de modelagem, definidas a seguir:

- Pré-processamento: Esta etapa envolve a modelagem do problema, com a definição do domínio ou geometria de interesse e a sua divisão em pequenos volumes, o que define a malha da discretização. As propriedades do fluido e a especificação das condições nas fronteiras também são configuradas nesta etapa.
- *Solver*: Este elemento emprega a técnica numérica escolhida para resolver o sistema de equações que governam o escoamento do fluido, definindo os seus critérios de aproximação para determinar as variáveis que caracterizam o problema;
- Pós-processamento: Este campo utiliza-se de ferramentas para tratamento dos dados e visualização dos resultados obtidos.

O MVF é um conjunto de ferramentas que empregam técnicas numéricas que são utilizadas pelo *Solver* de códigos *CFD*. Neste trabalho, a descrição dos detalhes desse método está baseada nos conceitos apresentados conforme Versteeg e Malalasekera (1995). O algoritmo numérico consiste nas seguintes etapas:

- Integração das equações que governam o escoamento do fluido sobre os volumes finitos definidos no domínio do fluido;
- Conversão das equações integrais num sistema algébrico de equações com a aproximação por diferenças finitas dos termos convectivos, difusivos e fontes da variável de interesse do escoamento. As variáveis nodais são utilizadas para aproximar numericamente o valor da variável fora dos pontos nodais, bem como suas derivadas;
- Aplicação de um processo iterativo para solução das equações algébricas.

As equações que governam o escoamento podem ser reescritas e resumidas pela Equação 19, conhecida como Equação do Transporte da Propriedade ϕ :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{(I)} + \underbrace{div(\rho\phi\vec{u})}_{(II)} = \underbrace{div(\Gamma grad\phi)}_{(III)} + \underbrace{S_\phi}_{(IV)} \quad (19)$$

onde:

$\rho = \rho(x, y, z, t)$:.....massa específica do fluido

$\phi = \phi(x, y, z, t)$:.....propriedade intensiva do fluido

$\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$:.....vetor velocidade

Γ :.....coeficiente de difusão

$div ()$:.....operador divergente

$grad ()$:.....operador gradiente

S_ϕ :.....termo fonte ou sorvedouro

A Equação 19 é uma equação não permanente e tridimensional que, com a correta escolha da propriedade ϕ , pode recuperar as equações diferenciais de conservação de massa, de quantidade de movimento e de energia para um elemento do fluido.

Essa equação apresenta quatro termos que definem os processos do transporte da propriedade de interesse no elemento de fluido. O termo (I) representa a taxa de variação temporal da propriedade ϕ . O termo (II) diz respeito ao termo convectivo ou ao balanço do fluxo de entrada e saída da propriedade no elemento de fluido. A soma dos termos (I) e (II) denomina-se derivada total ou substantiva.

O processo difusivo da propriedade ϕ está descrito pelo termo (III) que depende do coeficiente de difusão Γ . E, por fim, o termo (IV) está associado ao processo de fonte ou sorvedouro da propriedade.

A integração da Equação 19 sobre um volume de controle VC é o passo chave no desenvolvimento do MVF. Aplicando-se o teorema da divergência de Gauss nessa equação para substituir integrais volumétricas por integrais avaliadas em superfícies, chega-se a forma integral da equação de transporte descrita pela Equação 20 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} (\rho \phi) dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \vec{n} (\rho \phi \vec{u}) dA dt = \int_{\Delta t} \int_A \vec{n} (\Gamma_{\phi} \text{grad} \phi) dA dt + \int_{\Delta t} \int_{VC} S_{\phi} dV dt \quad (20)$$

(I) (II) (III) (IV)

onde:

$\rho = \rho(x, y, z, t)$:.....massa específica do fluido

$\phi = \phi(x, y, z, t)$:.....propriedade intensiva do fluido

$\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t)$:.....vetor velocidade

Γ :.....coeficiente de difusão

$\text{div} ()$:.....operador divergente

$\text{grad} ()$:.....operador gradiente

S_{ϕ} :.....termo fonte ou sorvedouro

Δt :.....intervalo de tempo

VC :.....volume de controle de integração

A :.....superfície de contorno do volume de controle

$\vec{n} = \vec{n}(x, y, z, t)$:.....vetor normal à superfície A

Da mesma forma que descrito anteriormente, os termos de (I) a (IV) têm o mesmo significado físico do processo de transporte, porém agora se considera a sua integração para um dado volume de controle VC .

O volume de interesse ou domínio é subdividido em células ou volumes finitos nos quais a Equação 20 é aplicada. Denomina-se malha de discretização o resultado desse processo de subdividir o domínio do fluido em pequenas partes.

2.3.2. Modelo de turbulência

O escoamento, que no caso deste trabalho está confinado a um conduto, pode ser classificado em regime laminar ou turbulento de acordo com um parâmetro adimensional que define a razão entre as forças de inércia do escoamento e as forças viscosas do fluido.

Este parâmetro, denominado número de Reynolds “ Re ”, pode ser definido de modo geral por “ $Re = V \cdot D / \nu$ ”, onde “ V ” é a velocidade média do escoamento, “ D ” é um comprimento característico que no caso de condutos forçados é o seu diâmetro interno e “ ν ” é a viscosidade cinemática do fluido. De modo geral, para escoamentos em condutos forçados com $Re > 3000$ o escoamento caracteriza-se como turbulento (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010).

A turbulência é um fenômeno físico transiente e tridimensional que emerge a partir da interação dos elementos de fluido em certas condições de instabilidade a partir do escoamento laminar. Esse fenômeno caracteriza-se pela sua aleatoriedade e por apresentar estruturas bem definidas, como é o caso dos turbilhões de diferentes tamanhos ou escalas de comprimento (TENNEKES; LUMLEY, 1972).

Para a modelagem matemática da turbulência, pode-se considerar o seu caráter aleatório juntamente com as equações de Navier-Stokes para uma propriedade ϕ definida anteriormente.

Considerando o caráter aleatório, uma dada propriedade do escoamento pode ser escrita ou decomposta em duas componentes, uma componente média que independe do tempo e uma componente flutuante, dependente do tempo. Aplicando

esse conceito para uma dada propriedade do escoamento, por exemplo, a velocidade u (direção x), tem-se $u(t) = U + u'(t)$.

As equações de Navier-Stokes resultam da conservação de quantidade de movimento para um elemento do fluido. No caso de um escoamento incompressível e viscosidade constante, a equação da continuidade e de Navier-Stokes são representadas pelas Equações 21 a 24 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\text{div } \vec{u} = 0 \quad (21)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div} (u \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \text{div grad } u \quad (22)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div} (v \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \text{div grad } v \quad (23)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div} (w \vec{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \text{div grad } w \quad (24)$$

onde:

ρ :.....massa específica do fluido

ν :.....viscosidade cinemática do fluido

$\vec{u} = (u, v, w)$:..... vetor velocidade e suas componentes

p :.....pressão local

$\text{div} ()$:.....operador divergente

$\text{grad} ()$:.....operador gradiente

Substituindo as variáveis velocidade " u, v, w " e pressão " p " por suas respectivas componentes média (U, V, W e P) e flutuante (u', v', w' e p') nas Equações 21 a 24, realizando as devidas manipulações matemáticas e considerando a média temporal dos termos que compõem a equação individualmente, chega-se nas Equações 25 a 28, sendo o conjunto formado pelas três últimas denominado Equações de Reynolds:

$$\text{div } \vec{U} = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \text{div} (U \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \text{div grad } U + \left[-\frac{\partial \overline{u'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right] \quad (26)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \text{div} (V \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \text{div grad } V + \left[-\frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'^2}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} \right] \quad (27)$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + \text{div} (W \vec{U}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \text{div grad } W + \left[-\frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{v'w'}}{\partial z} - \frac{\partial \overline{w'^2}}{\partial x} \right] \quad (28)$$

O processo de avaliação da média temporal dos termos flutuantes introduz o último termo das Equações 26 a 28. Estes termos representam a combinação de seis tensões adicionais, sendo três normais e três de cisalhamento, denominadas Tensões de Reynolds.

A completa determinação do escoamento turbulento consiste na solução do sistema de equações que considera as Equações de Reynolds e os seus termos extras. O sistema pode ser resolvido com a proposição de formulações para representar matematicamente tais termos ou tensões de Reynolds.

Uma primeira aproximação consiste na definição do conceito de viscosidade turbulenta proposto por Boussinesq (FERZIGER; PERIC, 2002 e VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). Tal conceito pressupõe que as tensões de Reynolds estão associadas às taxas de deformação do escoamento médio. Isto implica na definição de uma viscosidade turbulenta associada ao escoamento, que está associada às tensões de Reynolds pela Equação 29 em notação indicial.

Por convenção da notação indicial, os índices “*i*” ou “*j*” podem assumir os valores 1, 2 ou 3, representando as direções *x*, *y* e *z*, respectivamente.

Como exemplo de representação na notação indicial, a parcela flutuante da velocidade é descrita por suas componentes $u_1' = u'$ (direção *x*), $u_2' = v'$ (direção *y*) e $u_3' = w'$ (direção *z*).

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (29)$$

onde:

i, j :.....Índices que representam as direções *x*, *y* e *z*

τ_{ij} :.....tensão normal ou cisalhante ao elemento de fluido
 μ_t :.....viscosidade turbulenta

O modelo de turbulência k-epsilon (modelo $k - \varepsilon$) está baseado na ideia de viscosidade turbulenta e na Equação 29 acima. Este modelo é comumente empregado em códigos CFD com ampla validação de seus resultados e tem como foco os mecanismos que afetam a energia cinética turbulenta.

O desenvolvimento desse modelo considera a definição de dois conceitos importantes que dão nome ao modelo: a energia cinética turbulenta (k) e a taxa de dissipação dessa energia por unidade de massa (ε).

O modelo $k - \varepsilon$ padrão utiliza as equações de transporte apresentadas anteriormente para as variáveis k e ε . O conjunto de equações que definem esse modelo está descrito a seguir (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995):

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (30)$$

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}}_{(I)} + \underbrace{\text{div}(\rho k \vec{U})}_{(II)} = \underbrace{\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k\right]}_{(III)} + \underbrace{2 \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij}}_{(IV)} - \underbrace{\rho \varepsilon}_{(V)} \quad (31)$$

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}}_{(I)} + \underbrace{\text{div}(\rho \varepsilon \vec{U})}_{(II)} = \underbrace{\text{div}\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{grad } \varepsilon\right]}_{(III)} + \underbrace{C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \mu_t E_{ij} \cdot E_{ij}}_{(IV)} - \underbrace{C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}}_{(V)} \quad (32)$$

onde “ $E_{ij} \cdot E_{ij}$ ” indica o produto escalar dos tensores “taxa de deformação média” do fluido “ E_{ij} ”, descrito em notação indicial. Lembrando que, por convenção desta notação, os índices “ i ” ou “ j ” podem assumir os valores 1, 2 ou 3, representando as direções x, y e z, respectivamente.

No modelo $k - \varepsilon$ padrão, as constantes assumem os seguintes valores:

$$\begin{aligned} C_\mu &= 0,09 & C_{1\varepsilon} &= 1,44 \\ \sigma_k &= 1,00 & C_{2\varepsilon} &= 1,92 \\ \sigma_\varepsilon &= 1,30 \end{aligned}$$

Os termos indicados de (I) a (V) nas Equações 31 e 32 representam os processos físicos do transporte de $k - \varepsilon$ no escoamento do fluido:

- (I) = taxa de produção;
- (II) = transporte por convecção;
- (III) = transporte por difusão;
- (IV) = taxa de produção;
- (V) = taxa de destruição.

As vantagens atribuídas a este modelo, no que diz respeito à sua simplicidade, bom desempenho em processos industriais e por estar bem estabelecido e validado (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995), implicam na sua empregabilidade para os estudos propostos neste trabalho que se utilizam da fluidodinâmica computacional.

2.3.3. Parâmetro adimensional y^+

A estrutura do escoamento turbulento possui características bem definidas quando se analisa a distância “ y ” entre o elemento de fluido e a parede sólida que delimita o volume de controle de interesse.

Valores pequenos de “ y ”, tomados próximo à parede, apresentam baixo número de Reynolds, o que implica no prevalecimento dos efeitos das forças viscosas. Afastando-se da parede, a partir de certo valor de “ y ”, os efeitos das forças inerciais tornam-se predominantes.

Porém, a velocidade média da região da parede, depende não só da distância “ y ”, como também das características do fluido e do escoamento (massa específica e viscosidade dinâmica) e da tensão de cisalhamento na parede, representada pela velocidade de atrito (u_*).

Assim, a distância adimensional y^+ , que caracteriza o escoamento a partir da parede, é definida pela Equação 33.

$$y^+ = \frac{\rho u_* y}{\mu} \quad (33)$$

O refinamento da malha de discretização deve assegurar que o valor de y^+ do elemento próximo à parede esteja entre 30 e 500 para garantir a validade do modelo de turbulência adotado: modelo $k - \varepsilon$ padrão, conforme detalhado em VERSTEEG e MALALASEKERA (1995) e ANSYS (2013c).

Para alto Número de Reynolds, o “modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão” utiliza-se das formulações teóricas de Camada Limite apresentadas pelas “Leis de Parede” para determinar a velocidade média dos elementos do fluido que satisfazem a condição $30 < y^+ < 500$. Neste caso, os elementos mais próximos à parede estão contidos na Camada Logarítmica e as suas respectivas velocidades são determinadas pela Lei Logarítmica da teoria de escoamento em camada limite. (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995 e ANSYS, 2013c).

2.4. O DIMENSIONAMENTO DA CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO SEGUNDO DIRETRIZES ESTABELECIDAS EM NORMA TÉCNICA

2.4.1. Geral

A Norma Técnica Brasileira NBR12596 (ABNT, 1992) fixa os requisitos aplicáveis ao dimensionamento hidráulico preliminar da chaminé de equilíbrio de seção constante na adução de pequenas centrais hidrelétricas.

Essas diretrizes e procedimentos estão apoiados na teoria de modelagem unidimensional (1D) apresentada no item 2.2 e define coeficientes de segurança a serem empregados na determinação dos níveis d'água máximo e mínimo no interior da chaminé.

A nomenclatura apresentada nos subitens seguintes será a mesma daquela apresentada no item 2.2 que faz referência ao desenho esquemático da Figura 05. Além disso, apenas a condição de fechamento abrupto da válvula será considerada na determinação do primeiro máximo e primeiro mínimo, para as mesmas características hidráulicas do circuito adutor.

2.4.2. Necessidade de Instalação da Chaminé de Equilíbrio

A necessidade de instalação da chaminé de equilíbrio num empreendimento hidrelétrico pode ser verificada segundo os critérios compilados abaixo que estão apresentados em ABNT (1992), ELETROBRAS (2000) e ELETROBRAS (2003).

A indicação preliminar para a não necessidade de instalação de uma chaminé é obtida a partir da seguinte relação:

$$\frac{L}{H} \leq 5 \quad (34)$$

Assim, se o circuito adutor apresentar um comprimento linear menor que cinco vezes a queda bruta do empreendimento, o projeto não tem evidências da necessidade de instalação de dispositivo de proteção contra o golpe de aríete causado pela variação de descarga.

Outro critério de verificação de tal necessidade utiliza-se da definição da constante de aceleração do escoamento “ t_h ” do conduto forçado, definida por:

$$t_h = \frac{V L}{g H} \quad (35)$$

onde:

t_h :tempo de aceleração do escoamento no conduto forçado, em s

Segundo esse critério, para $t_h < 3,0$ s, não há a necessidade de instalação de uma chaminé entre o reservatório e a saída ou válvula de controle. Para valores de t_h entre 3,0 e 6,0 s a instalação é desejável, mas não obrigatória. Para $t_h > 6,0$ s, torna-se obrigatória a instalação de um dispositivo de proteção contra as sobre pressões, no caso, a instalação de uma chaminé de equilíbrio.

Esse critério está relacionado à capacidade do circuito suprir a vazão demandada pelas turbinas, ou seja, garantir que a vazão turbinada seja atendida.

2.4.3. Dimensionamento Hidráulico da Chaminé de Equilíbrio

Segundo Schreiber (1977), uma chaminé de equilíbrio corretamente dimensionada possibilita amortecer rapidamente as oscilações de nível dentro da chaminé, bem como proporcionar valores limites de máximo e mínimo das amplitudes de oscilação que se mantenham dentro da chaminé.

Além disso, uma chaminé é dita hidraulicamente estável quando consegue amortecer as oscilações provocadas pelo movimento dos distribuidores da turbina.

A formulação apresentada considera um caso simples de chaminé de equilíbrio, constituído por uma única adução e uma chaminé do tipo cilíndrica vertical com superfície livre.

Dieter Thoma, em 1910, foi o primeiro a mostrar que a chaminé de equilíbrio seria hidraulicamente estável somente se a área da sua seção transversal fosse maior que certo valor mínimo (PORTO, 1986). A estabilidade do nível d'água na chaminé está associada a sua capacidade de amortecer as pequenas variações da vazão turbinada ou de engolimento que são causadas pelos reguladores automáticos das turbinas, uma vez que tais reguladores tendem a manter constante a potência produzida pelas turbinas.

Conforme descrito em Jaeger (1977), o valor mínimo para a área da chaminé deve respeitar o critério de estabilidade de Thoma, ou seja, a área da chaminé (A_S) de equilíbrio deve ser maior que um valor mínimo denominado Área de Thoma (A_{TH}), sendo esta definida pela Equação 36 abaixo:

$$A_S \geq A_{TH} = \left(\frac{v_0^2}{2g} \right) \frac{L A_T}{F v_0^2 (H - F v_0^2)} \quad (36)$$

A determinação da área mínima depende da perda de carga no conduto adutor. As perdas de carga por atrito reduzem a amplitude da primeira sobre elevação devida a um fechamento da válvula de controle.

A determinação dos níveis d'água limites (máximo e mínimo) dentro da chaminé não deve considerar as perdas de carga do sistema adutor, pois esta é a condição crítica de projeto. Assim, a elevação do nível d'água estático máximo e a depressão do nível d'água estático mínimo, pode ser determinada a partir da Equação 09 do item 2.2 transcrita abaixo:

$$z_* = v_0 \cdot \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{A_r}{A_s}} \quad (09)$$

Para a determinação do nível d'água máximo na chaminé (z_{max}) aplica-se um fator de correção “ C_{max} ” que leva em consideração a perda de carga por atrito no conduto adutor, o que implica numa redução da amplitude do nível máximo com o consequente amortecimento da oscilação.

Esse fator de correção C_{max} depende do parâmetro adimensional k que traduz as características do circuito hidráulico de interesse no instante inicial, com escoamento em regime permanente. Essas relações estão definidas pelas Equações 37, 38 e 39.

$$k = \frac{z_0}{z_*} \quad (37)$$

$$C_{max} = 1 - \frac{2}{3}k + \frac{1}{9}k^2 \quad (38)$$

$$z_{max} = C_{max} \cdot z_* \quad (39)$$

De maneira análoga pode-se determinar o nível d'água mínimo consecutivo ao primeiro máximo da oscilação de nível d'água, sendo ambos causados pelo fechamento abrupto da válvula de controle.

Para a determinação do nível d'água mínimo na chaminé (z_{min}) aplica-se um fator de correção “ C_{min} ” que leva em consideração a perda de carga por atrito no conduto adutor, o que implica numa redução da amplitude do nível mínimo com o consequente amortecimento da oscilação.

Esse fator de correção C_{min} também se relaciona com o parâmetro adimensional k que traduz as características do circuito hidráulico de interesse no instante inicial, com escoamento em regime permanente. Essas novas relações estão definidas pela Equação 38 e pela Tabela 01, que apresenta a relação entre k e C_{min} .

$$z_{\min} = C_{\min} \cdot z_* \quad (40)$$

Na prática, as empresas projetistas consideram uma margem de segurança para a altura de projeto da borda superior da estrutura da chaminé de equilíbrio. Assim, essa altura é determinada por:

$$H_{\text{chaminé}} = H_a + z_{\max} + z_{fs} \quad (41)$$

onde:

z_{fs} :acréscimo de segurança de 1,0 m na elevação máxima

Tabela 01 – Determinação do coeficiente $C_{\min}$ em função de k

k	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
0,00	1,000	0,982	0,964	0,946	0,928	0,910	0,895	0,881	0,866	0,852
0,10	0,837	0,823	0,809	0,794	0,780	0,766	0,755	0,744	0,734	0,523
0,20	0,712	0,702	0,692	0,683	0,673	0,663	0,654	0,645	0,637	0,628
0,30	0,619	0,611	0,603	0,594	0,586	0,578	0,570	0,562	0,555	0,547
0,40	0,539	0,532	0,526	0,519	0,513	0,506	0,500	0,494	0,487	0,481
0,50	0,475	0,469	0,464	0,458	0,453	0,447	0,442	0,437	0,432	0,427
0,60	0,422	0,417	0,412	0,408	0,403	0,398	0,394	0,390	0,386	0,382
0,70	0,378	0,374	0,371	0,367	0,364	0,360	0,357	0,353	0,350	0,346
0,80	0,343	0,340	0,337	0,334	0,331	0,328	0,325	0,322	0,319	0,316
0,90	0,313	0,310	0,308	0,305	0,303	0,300	0,298	0,296	0,293	0,291
1,00	0,289	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de Norma Técnica Brasileira NBR12596 (ABNT, 1992).

A verificação de afogamento do conduto na região da chaminé, ou seja, a garantia de que o nível mínimo está confinado no interior da chaminé, está definida pela inequação a seguir para a condição de fechamento de válvula:

$$H_a - z_{\min} - z_{fs} \geq 0 \quad (42)$$

onde:

z_{fs} :decrécimo de segurança de 1,0 m na elevação mínima

Conforme apresentado pela Equação 10 do item 2.2, o período da onda que representa a oscilação do nível para as condições apresentadas do circuito hidráulico e do escoamento está transcrito abaixo:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{L}{g} \cdot \frac{A_s}{A_T}} \quad (10)$$

3. METODOLOGIA E DEFINIÇÕES DOS MODELOS

3.1. GERAL

A primeira abordagem deste trabalho consiste na comparação dos resultados experimentais com a modelagem teórica 1D (uni dimensional) e a modelagem computacional numérica CFD 3D (tri dimensional) para a chaminé de equilíbrio didática do Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – CTH / EPUSP.

Na segunda abordagem deste trabalho, dois estudos de caso são avaliados tanto com a abordagem analítica e de dimensionamento da NBR12596, quanto com a abordagem numérica *CFD*, para descrever o comportamento do transitório hidráulico.

Ambas as abordagens representam o fenômeno transitório de oscilação de massa ou nível d'água na chaminé de equilíbrio causado pelo fechamento instantâneo ou abrupto da válvula de controle instalada a jusante ou na saída do circuito hidráulico.

Os resultados experimentais consistem nas medições dos níveis d'água na chaminé de equilíbrio nas condições inicial em regime permanente, nível máximo e nível mínimo, com seus respectivos tempos.

A abordagem analítica representa a utilização das equações de conservação e da modelagem 1D (uni dimensional) com suas respectivas hipóteses simplificadoras para esse tipo de problema: oscilação de massa ou nível d'água em Chaminé de Equilíbrio.

A abordagem numérica representa a utilização do pacote Ansys Workbench versão acadêmica para modelagem 3D (tri dimensional), com o emprego do MVF para resolver o escoamento do fluido tanto em regime permanente, quanto em regime transitório para o dado volume de controle.

Os dois estudos de caso são apresentados como Caso 1 e Caso 2 e possuem a mesma geometria do problema e o mesmo evento causador do transitório hidráulico, fechamento instantâneo na seção de saída. Eles diferem apenas na velocidade média do escoamento na condição inicial ou vazão efluente em regime permanente.

No desenvolvimento deste trabalho, a queda de pressão total (ou perda de carga total) entre dois pontos distintos do circuito adutor será avaliada com base na Lei universal de perda de carga distribuída e pela Lei de perda de carga localizada (FOX; PRITCHARD; MCDONALD, 2010 e LENCASTRE, 1983). Essa formulação está apresentada na Equação 43, seguida pela definição dos seus termos:

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho g} = K \frac{v^2}{2g} + f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (43)$$

onde:

ΔH :perda de carga total (m)

Δp :queda de pressão (Pa)

ρ :massa específica do fluido (kg/m³)

g :aceleração da gravidade (m/s²)

v :velocidade média do escoamento no conduto (m/s)

L :comprimento do conduto (m)

D :diâmetro interno do conduto (m)

K :coeficiente de perda de carga associada a uma singularidade (adimensional)

f :fator de atrito da fórmula universal de perda de carga distribuída (adimensional)

Dessa forma, o coeficiente de perda de carga total “ F ” apresentado na Equação 01 pode ser avaliado como:

$$F = -\frac{z_0}{v_0^2} = \left(K + f \frac{L}{D} \right) \frac{1}{2g} \quad (44)$$

A aplicação das fórmulas para o cálculo das variáveis de interesse, que são função de grandezas medidas, deve considerar os erros ou incertezas nas leituras ou medições. Esses erros ou incertezas são propagados para a variável calculada seguindo a formulação da metodologia apresentada nas expressões a seguir (VUOLO, 1992).

Seja “ w ” uma variável calculada em função das grandezas medidas “ x ” e “ y ” (Equação 45) que possuem os erros de leitura “ σ_x ” e “ σ_y ”, respectivamente. O erro “ σ_w ” associado ao cálculo de “ w ” é determinado pela Equação 46.

$$w = w(x, y) \quad (45)$$

$$\sigma_w^2 = \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \sigma_y^2 \quad (46)$$

3.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIDÁTICA – LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA – CTH / EPUSP

3.2.1. Geral

As instalações do Laboratório Didático de Hidráulica, que estão localizadas no Centro Tecnológicas de Hidráulica (CTH) - Universidade de São Paulo (USP), foram utilizadas para reproduzir experimentalmente o fenômeno de oscilação de massa na chaminé de equilíbrio didática disponível.

O circuito hidráulico deste laboratório tem dimensões reduzidas se comparadas com aquelas determinadas pelo dimensionamento de uma chaminé de equilíbrio para o caso real de uma PCH típica.

As Figuras 08 e 09 mostram o aparato experimental da Chaminé de Equilíbrio Didática das instalações disponíveis no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP).

Os termos utilizados para identificar os elementos que compõem o circuito hidráulico didático seguem a nomenclatura apresentada na revisão bibliográfica, item 2.2. Assim, pode-se comparar de forma direta o aparato experimental com a nomenclatura da formulação teórica, para evitar qualquer dúvida de entendimento.

A chaminé de equilíbrio está representada pelo tubo vertical em acrílico e possui uma escala graduada e milimétrica fixada na sua face externa. Dessa forma, o nível d'água na chaminé pode ser lido diretamente pelo valor indicado na escala graduada.

O reservatório é alimentado por bombas de recalque para garantir o fornecimento contínuo da vazão de água que passa pelo circuito hidráulico. O nível

d'água no reservatório é mantido constante por meio de uma soleira vertente de superfície livre que extravasa a vazão de água que não é direcionada para a tubulação de alimentação da chaminé.

Uma válvula do tipo esfera está localizada no trecho final do circuito hidráulico para controlar a vazão de água que escoar a partir do reservatório, além de possibilitar o fenômeno oscilatório com o seu fechamento abrupto ou instantâneo.

Figura 08 – Instalações da Chaminé de Equilíbrio Didática CTH / EPUSP – vista do trecho a montante do circuito hidráulico

Fonte: Próprio Autor.

O circuito está caracterizado com um coeficiente de perda de carga singular na entrada do reservatório $K_e = 0,75$ e um coeficiente de perda de carga distribuída no conduto adutor entre o reservatório e a chaminé $f = 0,023$ (SOUZA; ACCORSI, 2017).

As principais características geométricas da chaminé de equilíbrio didática estão esquematizadas na Figura 10, conforme apresentado em Souza e Accorsi (2017). O valor de referência para o nível d'água na chaminé é o nível d'água constante do reservatório.

Figura 09 – Chaminé de Equilíbrio Didática CTH / EPUSP – detalhe do trecho final do circuito hidráulico

Fonte: Próprio Autor.

Um resumo das características geométricas do aparato experimental está apresentado na Tabela 02 e faz referência ao diagrama esquemático da Figura 10.

Neste trabalho, os dados geométricos e construtivos do aparato experimental (SOUZA; ACCORSI, 2017) serão considerados como valor verdadeiro das grandezas e, portanto, os seus valores serão admitidos isento de erros. Essa premissa pode ser adotada uma vez que a avaliação dos efeitos de tais incertezas no fenômeno oscilatório está fora do escopo deste trabalho.

Tabela 02 – Chaminé de equilíbrio didática CTH / EPUSP – resumo dos dados

Grandeza	Valor	Unidade
L	12,69	m
D_T	0,1016	m
D_S	0,1870	m
A_T	0,0081	m ²
A_S	0,0275	m ²
ρ	997	kg/m ³
g	9,81	m/s ²

Figura 10 – Desenho esquemático do aparato experimental da Chaminé de Equilíbrio Didática CTH / EPUSP

Fonte: Próprio Autor.

3.2.2. Procedimento Experimental

O procedimento experimental consistiu nas medições do conjunto de dados básicos que caracterizam o fenômeno oscilatório na chaminé de equilíbrio. A sequência do procedimento experimental pode ser resumida por:

1. Leitura do nível de água do reservatório alimentador ou nível de referência, pela escala graduada milimétrica fixada na chaminé, na condição de válvula fechada ou vazão nula;
2. Abertura parcial da válvula de controle para o estabelecimento de uma condição inicial com uma determinada vazão, na condição de regime permanente;
3. Leitura do nível de água na chaminé, na condição inicial em regime permanente;
4. Leitura dos instantes de ocorrência ou tempo após o fechamento abrupto da válvula de controle, bem como os respectivos níveis de água na chaminé de equilíbrio, para os seus respectivos alcances extremos (dois primeiros máximos e primeiro mínimo).

Neste trabalho, dois conjuntos de medições (M1 e M2) foram realizados. Cada conjunto está associado a uma determinada vazão definida pela posição de abertura da válvula de controle.

Os instantes de leitura de nível que estão indicados nas Tabelas 02 e 03 representam os instantes de interesse que caracterizam o fenômeno oscilatório:

- $i = 0$:.....medição na condição inicial, com escoamento em regime permanente;
- $i = 1$ a 3 :.....medição nos instantes de primeiro máximo, seguido do primeiro mínimo e do segundo máximo, no escoamento transitório;

Os valores das medições M1 e M2 estão apresentados nas Tabelas 03 e 04. Para ambas as condições, a leitura realizada para o nível do reservatório, na condição de válvula fechada ou vazão nula, é de 842 ± 2 mm. Nestas tabelas, o valor da leitura da régua está associado a variável “ y “, não definida anteriormente, que representa a elevação do nível d’água no interior da chaminé de equilíbrio a partir da linha de centro do conduto adutor, na interligação com a chaminé.

Tabela 03 – Medição experimental M1 da chaminé de equilíbrio didática CTH / EPUSP

instante - i	0	1	2	3
tempo - t (s)	0,00	$11,2 \pm 0,3$	$17,9 \pm 0,3$	$24,4 \pm 0,3$
régua - y (mm)	250 ± 2	1491 ± 2	433 ± 2	1155 ± 2

Tabela 04 – Medição experimental M2 da chaminé de equilíbrio didática CTH / EPUSP

instante - i	0	1	2	3
tempo - t (s)	0,00	$4,6 \pm 0,3$	$11,1 \pm 0,3$	$17,6 \pm 0,3$
régua - y (mm)	410 ± 2	1430 ± 2	460 ± 2	1133 ± 2

3.2.3. Caracterização hidráulica do escoamento a partir dos dados experimentais

As principais características geométricas da chaminé de equilíbrio didática estão definidas no item anterior. Conforme apresentado, duas medições M1 e M2 foram realizadas para leitura dos níveis que caracterizam o fenômeno oscilatório.

Com base nesses dados, as características hidráulicas do escoamento foram calculadas para as medições M1 e M2 (Tabela 05).

A velocidade na condição inicial “ v_0 ” para o escoamento em regime permanente foi calculada por meio da Equação 44. O período “ T ” do fenômeno oscilatório foi determinado pela diferença entre os valores de tempo medidos para os instantes 1 e 3, que representam o primeiro e o segundo máximo, respectivamente.

A propagação de erro foi determinada para todos os valores calculados, seguindo a formulação das Equações 45 e 46.

Parâmetros de entrada:

$$K_e = 0,75 ; f = 0,023 ; L = 12,69 \text{ m} ; D = 0,1016 \text{ m}$$

Tabela 05 – Medições M1 e M2: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir dos dados experimentais

	M1	M2
$F \text{ (s}^2/\text{m)}$	0,18	0,18
$v_0 \text{ (m/s)}$	$1,79 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,01$
$z_0 \text{ (m)}$	$-0,592 \pm 0,003$	$-0,432 \pm 0,003$
$z_1 \text{ (m)}$	$0,649 \pm 0,003$	$0,588 \pm 0,003$
$z_2 \text{ (m)}$	$-0,409 \pm 0,003$	$-0,382 \pm 0,003$
$z_3 \text{ (m)}$	$0,313 \pm 0,003$	$0,291 \pm 0,003$
$T \text{ (s)}$	$13,2 \pm 0,4$	$13,0 \pm 0,4$

Os escoamentos são caracterizados, na condição inicial, com Número de Reynolds $Re > 10^5$ para ambas as Medições 01 e 02.

3.2.4. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo a Formulação Teórica e a Norma Técnica Brasileira NBR12596

A formulação desenvolvida no item 2.2 apresenta o conjunto de equações que fornece a solução analítica que determina a oscilação do nível d'água no interior da chaminé de equilíbrio para o caso um circuito hidráulico simples que contém uma chaminé de equilíbrio reta com seção constante, após o fechamento instantâneo da válvula de controle instalada na saída do circuito hidráulico.

As Equações 07 a 10 resolvem o fenômeno oscilatório desconsiderando as perdas de carga por atrito no conduto adutor. Entretanto, levando-se em consideração o coeficiente de atrito constante do conduto adutor, a solução teórica e analítica é fornecida pela Equação 11.

A Norma Técnica Brasileira NBR12596 determina o cálculo dos níveis de máximo e mínimo conforme a formulação teórica desconsiderando as perdas por atrito. Uma vez determinado esses níveis de máximo e mínimo, aplica-se um coeficiente de correção para determinar os valores que traduzem o efeito de amortecimento causado pelas perdas de carga na tubulação (Equações 39 e 40).

Com base nos dados de entrada descritos abaixo, a Tabela 06 apresenta o resultado segundo a formulação teórica. A Tabela 07 apresenta os resultados segundo as diretrizes da norma NBR12596. Para ambos os métodos, o valor considerado para as velocidades nas condições iniciais “ v_0 ” é aquele determinado pelas medições M1 e M2 (Tabela 05).

Parâmetros de entrada:

$$L = 12,69 \text{ m} ; F = 0,18 \text{ s}^2/\text{m} ; A_T = 0,0081 \text{ m}^2 ; A_S = 0,0275 \text{ m}^2 ; g = 9,81 \text{ kg/m}^3$$

Tabela 06 – Medições M1 e M2: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da formulação teórica

	M1	M2
v_0 (m/s)	$1,79 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,01$
z_* (m)	$1,11 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,01$
T (s)	13,2	13,2
z_0 (m)	$-0,592 \pm 0,003$	$-0,432 \pm 0,003$
z_1 (m)	0,75	0,68
z_2 (m)	-0,50	-0,47
z_3 (m)	0,38	0,36

Tabela 07 – Medições M1 e M2: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da norma NBR12596

	M1	M2
v_0 (m/s)	$1,79 \pm 0,01$	$1,53 \pm 0,01$
z_* (m)	$1,11 \pm 0,01$	$0,95 \pm 0,01$
T (s)	13,2	13,2
z_0 (m)	$-0,592 \pm 0,003$	$-0,432 \pm 0,003$
z_1 (m)	0,75	0,68
z_2 (m)	-0,51	-0,48
z_3 (m)	não definido pela norma	

3.2.5. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo o Método de Diferenças Finitas (Método de Pressel)

O método numérico 1D de diferenças finitas, utilizado neste estudo, está apresentado no item 2.2.4 (Método de Pressel).

Os parâmetros de entrada para avaliação temporal do nível d'água serão os mesmos apresentados como M1 e M2, conforme item 3.2.3.

O incremento de tempo “ Δt ” utilizado para atualizar as variáveis nível d'água “ $z(t)$ ” e velocidade média do escoamento no conduto “ $v(t)$ ” é de $\Delta t = 0,1$ s.

Este incremento apresentou boa estabilidade dos resultados, fato este que levou à sua escolha.

A análise dos erros numéricos e a propagação de incertezas associadas a este método não são objetos de estudo deste trabalho.

3.2.6. Fluidodinâmica Computacional – Configuração do Pré-processamento

Caracterização da Geometria

A primeira etapa da modelagem computacional *CFD* do problema proposto consiste na elaboração de uma geometria 3D que representa o domínio fluídico de interesse. O modelo tridimensional (3D) do volume de interesse foi construído no *software* “Ansys DesignModeler” (ANSYS, 2013a) a partir das dimensões bases apresentadas na Figura 10 e está apresentado na Figura 11.

As superfícies destacadas na Figura 11 representam as seções onde serão aplicadas as condições de contorno do escoamento. As demais superfícies da geometria em questão são consideradas como condição de contorno do tipo parede, onde as condições de parede lisa e de não escorregamento do fluido foram adotadas.

Essa geometria 3D representa o modelo computacional do circuito hidráulico didático com chaminé de equilíbrio construído no Laboratório de Hidráulica do CTH / EPUSP (Figuras 08 e 09).

Figura 11 – Modelo 3D do circuito hidráulico didático com indicação das seções de entrada (A *inlet*) e de saída (C *outlet*) e da abertura superior da Chaminé de Equilíbrio (B *opening*)

Fonte: Próprio Autor.

Caracterização da Malha

Após a definição da geometria do modelo 3D, o processo de discretização do domínio do fluido para gerar a malha de volumes finitos foi executado com o software “Ansys Meshing” (ANSYS, 2013b).

A escolha dos parâmetros, que definem e caracterizam a malha de discretização, foi determinada a partir de uma análise preliminar de independência de malha.

Esta análise consistiu em avaliar o nível d’água na chaminé de equilíbrio que foi fornecido como o resultado de diferentes simulações. Estas simulações foram executadas variando-se o tamanho limite máximo dos elementos da malha para uma mesma configuração hidráulica, sendo essa a condição inicial do escoamento em regime permanente.

A malha de discretização do domínio do fluido, que foi escolhida pela análise de independência de malha, está apresentada na Figura 12 e suas principais estatísticas estão resumidas na Tabela 08, que apresenta o valor total para o

número de nós, número de elementos e número de faces resultantes da discretização proposta.

Figura 12 – Detalhe da malha do volume de controle do circuito hidráulico didático

Fonte: Próprio Autor.

O volume de controle do fluido foi discretizado utilizando-se uma camada prismática na região das paredes com elementos do tipo Hexaedro. No interior dos condutos e da chaminé, a malha é constituída por elementos do tipo Tetraedro, configurando uma malha não estruturada. O tamanho máximo do elemento de malha foi limitado em 15 mm.

Tabela 08 – Resumo da malha do modelo 3D do circuito hidráulico didático

Número total de nós	173.863
Número total de elementos	491.215
Tetraedros	255.155
Prismas	236.060
Número total de faces	49.580

Os parâmetros de qualidade de malha foram avaliados pela rotina de diagnóstico de malha do *software* Ansys CFX e estão apresentados na Tabela 09.

Nesta tabela, pode ser verificado que os valores desses parâmetros estão adequados aos valores recomendados pelo desenvolvedor do *software* para controle dos erros relacionados à malha ou discretização do volume de controle (ANSYS, 2013c e ANSYS, 2013d).

Tabela 09 – Qualidade da malha *software* Ansys CFX do modelo 3D do circuito hidráulico didático

Diagnóstico de Qualidade da Malha (% do número total de elementos da malha)								
Ângulo de Ortogonalidade			Fator de Expansão			Razão de Aspecto		
ruim	aceitável	bom	ruim	aceitável	bom	ruim	aceitável	bom
0%	< 1%	> 99%	0%	1%	99%	0%	0%	100%

Caracterização das condições iniciais e de contorno

Os dados de entrada do *SETUP* do *software* “Ansys CFX-Pre” para as condições iniciais e de contorno da simulação de ambas as medições, M1 e M2, estão detalhados a seguir. Foram adotadas as práticas recomendadas pelo desenvolvedor do *software* para garantir uma simulação do tipo robusta com a finalidade de alcançar boa convergência dos parâmetros de controle do processo iterativo de cálculo.

A simulação para a condição inicial (t_0) considerou:

- Tipo de análise: permanente
- Numero máximo de iterações: 1000
- Critério de Convergência: RMS (*Root Mean Square*) com alvo de 1×10^{-4}
- Esquema de interpolação da Advecção: *High Resolution*
- Esquema de interpolação da Turbulência: *First Order*

A simulação para a condição após o fechamento da válvula ($t > 0$ s) foi configurada como:

- Tipo de análise: transiente
- Tempo total da simulação: 30 s
- Passo no tempo: 0,10 s
- Numero máximo de iterações em cada passo no tempo: 10

- Critério de Convergência: RMS (*Root Mean Square*) com alvo de 1×10^{-4}
- Esquema de interpolação da Advecção: *High Resolution*
- Esquema de interpolação da Turbulência: *First Order*
- Condição inicial: Campos de pressão e velocidade do regime permanente

Configuração do domínio fluido

O domínio fluido foi configurado com a mistura água/ar para possibilitar a simulação da superfície d'água na chaminé de equilíbrio. Os valores padrão do *software* foram adotados para definir as propriedades do fluido. Esses valores referem-se à condição de pressão = $1,01 \times 10^5$ Pa (1 atm) e temperatura = 25 °C.

- Massa específica da água: 997,0 kg/m³
- Viscosidade dinâmica da água: $8,899 \times 10^{-4}$ kg/(m.s)
- Massa específica do ar: 1,185 kg/m³
- Viscosidade dinâmica do ar: $1,831 \times 10^{-5}$ kg/(m.s)
- Pressão de Referência: $1,01 \times 10^5$ Pa (1 atm)
- Massa Específica de Referência para o modelo de flutuabilidade: 1,2 kg/m³
- Solução do Escoamento Multifásico: Modelo Homogêneo
- Modelo Solução de Superfície Livre: Standard
- Modelo de Turbulência: Modelo “ $k - \varepsilon$ ” padrão

Configuração das condições iniciais e de contorno

A localização das superfícies de aplicação das condições de contorno estão destacadas na Figura 11, as demais regiões não destacadas na figura são definidas como condição de contorno do tipo “parede”.

- Tipo da seção de entrada: *Opening*
- Condição de contorno-entrada: Pressão Total relativa $1,0 \times 10^4$ Pa (0,1 atm)
- Tipo da seção de saída: *Outlet*
- Condição de contorno-saída (t_0): Velocidade normal 1,79 m/s (M1) ou 1,53 m/s (M2)
- Condição de contorno-saída ($t > 0$): Velocidade nula (válvula fechada)
- Tipo da seção da abertura superior da chaminé: *Opening*
- Condição de contorno-abertura: *Entrainment* com Pressão relativa 0,0 Pa
- Condição de contorno-paredes: sem escorregamento e tipo “parede lisa”

3.3. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DO ESTUDO DE CASO

3.3.1. Definição da Geometria do Estudo de Caso

O circuito hidráulico avaliado no estudo de caso consiste de uma adução única interligando o reservatório da usina hidrelétrica ao dispositivo de controle de vazão, podendo ser uma válvula ou distribuidor da turbina, conforme apresentado na Figura 13.

Essa geometria deriva da análise das características médias de PCH's encontradas no Brasil, onde prevalecem empreendimentos de baixa queda. Adotou-se uma potência instalada aproximada de 3,5 MW com 22 m de queda bruta e uma tubulação de seção circular com diâmetro interno de 3,00 m ao longo de todo o seu comprimento.

Após a captação de água por uma entrada perpendicular ao reservatório, a tubulação adutora (baixa pressão) segue por um trecho horizontal de 40,00 m até encontrar o Tê de derivação que corresponde à entrada da Chaminé de Equilíbrio.

A Chaminé de Equilíbrio possui seção circular constante com diâmetro de 10,00 m na região acima do estrangulamento. Esse estrangulamento ou “garganta” está localizado na sua base e possui seção circular constante com diâmetro de 3,00 m e altura de 3,00m, contabilizada a partir da linha de centro do trecho horizontal da tubulação adutora.

Figura 13 – Características Geométricas Principais e Nível d'Água do Reservatório para o Circuito Hidráulico adotado no estudo de caso

Fonte: Próprio Autor.

O circuito hidráulico segue com o início do conduto forçado (alta pressão), que é constituído por um trecho horizontal de 10,00 m de comprimento, uma curva vertical com ângulo de $45,00^\circ$ e raio de 9,00 m, um trecho reto inclinado a 6,69 m de comprimento, uma segunda curva vertical com ângulo de $45,00^\circ$ e raio de 9,00 m, seguida pelo trecho final horizontal de 20,00 m de comprimento e a seção de saída, local onde se encontra o dispositivo de controle de vazão. A Tabela 10 apresenta um resumo das suas principais características geométricas para o estudo.

Tabela 10 – Chaminé de equilíbrio do estudo de caso – resumo dos dados

Grandeza	Valor	Unidade
L	38,50	m
D_T	3,00	m
D_S	10,00	m
A_T	7,07	m ²
A_S	78,54	m ²

A área da chaminé de equilíbrio foi determinada pela aplicação do critério de área mínima definida pela Área de Thoma (Equação 36). Os valores utilizados para as variáveis de entrada nessa equação consideram uma unidade hidro-geradora de potência instalada de 3,5 MW para o circuito hidráulico apresentado com queda bruta de 22 m.

3.3.2. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo a Formulação Teórica e Norma Técnica Brasileira NBR12596

Os critérios de projeto do estudo de caso serão empregados neste item para a determinação das principais características do regime transitório, representado pela oscilação de massa na Chaminé de Equilíbrio, fenômeno causado pelo fechamento abrupto do dispositivo de controle de vazão instalado na saída do conduto forçado, podendo ser uma válvula ou o distribuidor da turbina.

Dois casos (Caso 01 e Caso 02) serão estudados com essa mesma geometria proposta. Eles diferem na velocidade (v_0) para a condição inicial de escoamento em regime permanente. Além disso, será considerada a condição de paredes com superfície lisa (rugosidade nula) nos cálculos hidráulicos.

Dessa forma, a velocidade média na seção de saída será diferente para os Casos 01 e 02, o que resulta no conjunto de parâmetros apresentados na Tabela 11, onde a elevação do reservatório (Y_R) tem como referência a elevação da linha de centro do conduto adutor na captação (Figura 13).

Para os instantes de tempo $t > 0$ s, a velocidade (ou vazão) na saída é nula, representando o fechamento instantâneo ou abrupto do dispositivo de controle da adução.

Tabela 11 – Estudo de caso – dados do escoamento

Parâmetro	Caso 1	Caso 2
v_0 (m/s)	2,00	3,00
Q_0 (m ³ /s)	14,14	21,21
Y_R (m)	13,05	
Q (t > 0 s) (m ³ /s)	0,00	

Os escoamentos são caracterizados, na condição inicial, com Número de Reynolds $Re > 10^6$ para ambos os Casos 01 e 02.

A partir das configurações de geometria e condições iniciais do escoamento descritas acima, os níveis d'água na chaminé de equilíbrio para o regime permanente (t_0) para cada caso são detalhados a seguir, cujos parâmetros hidráulicos adotados e calculados são baseados em Fox, Pritchard e McDonald (2010), Lencastre (1983) e Streeter e Wylie (1982).

Parâmetros de entrada:

$$K_e = 0,75 ;$$

$f = 0,009$: calculado pela Equação de Colebrook-White para escoamento em regime turbulento (Fox; Pritchard; McDonald, 2010), adotando-se tubo de aço comercial com rugosidade absoluta equivalente de 0,045 mm);

$$L = 38,50 \text{ m};$$

$$D = 3,00 \text{ m}$$

$$A_T = 7,07 \text{ m}^2;$$

$$A_S = 78,54 \text{ m}^2;$$

$$g = 9,81 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_{agua} = 997 \text{ kg/m}^3;$$

$$\mu_{agua} = 8,899 \times 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}$$

Com base nestes dados de entrada, a Tabela 12 apresenta o resultado segundo a formulação teórica. A Tabela 13 apresenta os resultados segundo as diretrizes da norma NBR12596. Para ambos os métodos, o valor considerado para as velocidades nas condições iniciais “ v_0 ” é aquele definido para cada um dos Casos 01 e 02 (Tabela 11).

Tabela 12 – Casos 01 e 02: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da formulação teórica

	Caso 1	Caso 2
$F \text{ (s}^2/\text{m)}$	0,04	0,04
$v_0 \text{ (m/s)}$	2,00	3,00
$z_* \text{ (m)}$	1,19	1,78
$T \text{ (s)}$	41,5	41,5
$z_0 \text{ (m)}$	-0,18	-0,40
$z_1 \text{ (m)}$	1,07	1,53
$z_2 \text{ (m)}$	-0,91	-1,22
$z_3 \text{ (m)}$	0,79	1,01

Tabela 13 – Casos 01 e 02: características hidráulicas do escoamento em regime permanente e transitório calculadas a partir da norma NBR12596

	Caso 01	Caso 02
$F \text{ (s}^2\text{/m)}$	0,04	0,04
$v_0 \text{ (m/s)}$	2,00	3,00
$z_* \text{ (m)}$	1,19	1,78
$T \text{ (s)}$	41,5	41,5
$z_0 \text{ (m)}$	-0,18	-0,40
$z_1 \text{ (m)}$	1,07	1,53
$z_2 \text{ (m)}$	-0,93	-1,23

3.3.3. Avaliação do Transitório Hidráulico Segundo o Método de Diferenças Finitas (Pressel)

O método numérico 1D de diferenças finitas, utilizado neste estudo, está apresentado no item 2.2.4 (Método de Pressel).

Os parâmetros de entrada para avaliação temporal do nível d'água serão os mesmos apresentados como Caso 1 e Caso 2 conforme item 3.3.2.

O incremento de tempo “ Δt ” utilizado para atualizar as variáveis nível d'água “ $z(t)$ ” e velocidade média do escoamento no conduto “ $v(t)$ ” é de $\Delta t = 0,1 \text{ s}$.

Este incremento apresentou boa estabilidade dos resultados, fato este que levou à sua escolha.

A análise de erros numéricos e a propagação de incertezas associadas a este método não são objetos de estudo deste trabalho.

3.3.4. Fluidodinâmica Computacional – Configuração do Pré-processamento

Caracterização da Geometria

O modelo 3D foi construído no *software* “Ansys DesignModeler” e resultou na geometria da Figura 14, que apresenta as seções destacadas onde serão aplicadas as condições de contorno (ANSYS, 2013a). As demais superfícies da geometria em

questão consistem em “paredes”, onde as condições de parede lisa e de não escorregamento do fluido foram adotadas.

Figura 14 – Geometria utilizada na modelagem 3D do circuito hidráulico com indicação das seções de entrada de adução (A *inlet*), da abertura superior da Chaminé de Equilíbrio (B *opening*) e de saída do conduto (C *outlet*)

Fonte: Próprio Autor.

Caracterização da Malha

Conforme mencionado anteriormente, esta etapa do trabalho considerou um circuito hidráulico simples no que diz respeito à geometria dos seus elementos. Como resultado dessa escolha, a malha gerada pelo *software* “Ansys Meshing” para discretizar o volume de controle apresenta valores, para os parâmetros que avaliam a qualidade dessa malha, dentro dos intervalos recomendados pelo desenvolvedor do *software* (ANSYS, 2013b).

Figura 15 – Malha de discretização do volume de controle do estudo de caso

Fonte: Próprio Autor.

O volume de controle do fluido foi dividido em quatro regiões (Figura 15). As regiões 1, 2 e 4 foram discretizadas utilizando elementos do tipo Tetraedro, configurando uma malha não estruturada por tratar-se de regiões não complexas para o escoamento em questão. A região 3 (Tê) foi discretizada com elementos do tipo Hexaedro, em grande maioria, e do tipo Pirâmide em pequenas regiões, configurando uma malha estruturada dada a complexidade do escoamento nesta região.

A Tabela 14 apresenta o valor total para o número de nós, número de elementos e número de faces resultantes da discretização proposta. O tamanho máximo do elemento de malha foi limitado em 25 mm.

Tabela 14 – Resumo da Malha - número total dos elementos

Número total de nós	102.310
Número total de elementos	453.848
Tetraedros	437.932
Prismas	104
Hexaedros	15.300
Pirâmides	512
Número total de faces	61.390

Os parâmetros de qualidade de malha avaliados pelo *software* Ansys-CFX estão apresentados na Tabela 15. Nesta tabela pode ser verificado que os valores desses parâmetros estão adequados aos recomendados pelo desenvolvedor do *software* para controle dos erros relacionados à malha ou discretização do volume de controle (ANSYS, 2013c e ANSYS, 2013d).

Tabela 15 – Qualidade da malha *software* Ansys CFX do modelo 3D do estudo de caso

Diagnóstico de Qualidade da Malha (% do número total de elementos da malha)								
Ângulo de Ortogonalidade			Fator de Expansão			Razão de Aspecto		
ruim	aceitável	bom	ruim	aceitável	bom	ruim	aceitável	bom
0%	< 1%	99%	< 1%	1%	> 98%	0%	0%	100%

Caracterização das condições iniciais e de contorno

Os dados de entrada do *SETUP* do *software* “Ansys CFX-Pre” para condições iniciais e de contorno para ambos os casos (Caso 1 e Caso 2) estão detalhadas a seguir. Foram adotadas as práticas recomendadas pelo desenvolvedor do *software* para garantir uma simulação do tipo robusta com a finalidade de alcançar boa convergência dos parâmetros de controle do processo iterativo de cálculo.

A simulação para a condição inicial (t_0) considerou:

- Tipo de análise: permanente
- Numero máximo de iterações: 1000
- Critério de Convergência: RMS (*Root Mean Square*) com alvo de 1×10^{-4}
- Esquema de interpolação da Advecção: *High Resolution*
- Esquema de interpolação da Turbulência: *First Order*

A simulação para a condição após o fechamento da válvula ($t > 0$ s) foi configurada como:

- Tipo de análise: transiente
- Tempo total da simulação: 60 s
- Passo no tempo: 0,25 s
- Número máximo de iterações em cada passo no tempo: 10
- Critério de Convergência: RMS (*Root Mean Square*) com alvo de 1×10^{-4}

- Esquema de interpolação da Advecção: *High Resolution*
- Esquema de interpolação da Turbulência: *First Order*
- Condição inicial: Campos de pressão e velocidade do regime permanente

Configuração do domínio fluido

O domínio fluido foi configurado com a mistura água/ar para possibilitar a simulação da superfície d'água na chaminé de equilíbrio. Os valores padrão do *software* foram adotados para definir as propriedades do fluido. Esses valores referem-se à condição de pressão = $1,01 \times 10^5$ Pa (1 atm) e temperatura = 25 °C.

- Massa específica da água: $997,0 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidade dinâmica da água: $8,899 \times 10^{-4} \text{ kg/(m.s)}$
- Massa específica do ar: $1,185 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidade dinâmica do ar: $1,831 \times 10^{-5} \text{ kg/(m.s)}$
- Pressão de Referência: $1,01 \times 10^5$ Pa (1 atm)
- Massa Específica de Referência para o modelo de flutuabilidade: $1,2 \text{ kg/m}^3$
- Solução Escoamento Multifásico: Modelo Homogêneo
- Modelo Solução de Superfície Livre: *Standard*
- Modelo de Turbulência: Modelo “ $k - \varepsilon$ ” padrão

Configuração das condições iniciais e de contorno

A localização das condições de contorno pode ser visualizada na Figura 14, as demais regiões não destacadas na figura são definidas como “parede”.

- Tipo da seção de entrada: *Opening*
- Condição de contorno-entrada: Pressão Total relativa $1,218 \times 10^5$ Pa (1,26 atm)
- Tipo da seção de saída: *Outlet*
- Condição de contorno-saída (t_0): Velocidade normal 2 m/s (Caso 1) ou 3 m/s (Caso 2)
- Condição de contorno-saída ($t > 0$): Velocidade nula (válvula fechada)
- Tipo da seção da abertura superior da chaminé: *Opening*
- Condição de contorno-abertura: *Entrainment* com Pressão relativa 0,0 Pa
- Condição de contorno-paredes: sem escorregamento e tipo “parede lisa”

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. GERAL

Neste item são apresentados todos os resultados decorrentes da aplicação dos métodos de solução analítica, experimentais e numéricos computacionais que foram propostos neste trabalho, a fim de possibilitar a comparação e discussão dos dados obtidos e do emprego de suas respectivas técnicas.

Do mesmo modo que as duas abordagens foram apresentadas separadamente no texto. Os resultados para a abordagem experimental será separado da abordagem do estudo de caso. Para cada uma delas, os valores encontrados como resultado de cada método será apresentado, comparado e discutido.

Vale lembrar que em apenas uma dessas abordagens foram realizadas medições experimentais, a qual se refere à utilização do Laboratório Didático – CTH / EPUSP.

Ambos os estudos tratam de avaliar os efeitos do escoamento transitório de oscilação de massa resultante do fechamento instantâneo ou abrupto de uma válvula instalada na saída do circuito hidráulico.

4.2. CHAMINÉ DE EQUILÍBRIO DIDÁTICA – CTH / EPUSP

4.2.1. Dados Experimentais, Solução Analítica e aplicação das Diretrizes apresentadas na norma NBR12596

A apresentação desses resultados pode ser vista no item 3, juntamente com a apresentação das características hidráulicas do circuito envolvendo a chaminé de equilíbrio didática.

No item 4.2.4 apresenta-se novamente e de modo comparativo os resultados experimentais, de solução analítica e de aplicação das diretrizes da norma NBR12596.

4.2.2. Método de Pressel aplicado ao Circuito Hidráulico Didático

A técnica de diferenças finitas (1D) aplicada para resolver a oscilação d'água na chaminé de equilíbrio resulta nas curvas das Figura 16 e 17 para as condições hidráulicas definidas pelas medições M1 e M2, respectivamente.

Os valores extremos para os níveis d'água estão apresentados no item 4.2.4.

Figura 16 – (M1) Nível d'Água na Chaminé z (m) - Método de Pressel

Fonte: Próprio Autor.

Figura 17 – (M2) Nível d'Água na Chaminé z (m) - Método de Pressel

Fonte: Próprio Autor.

4.2.3. Fluidodinâmica Computacional Aplicada ao Circuito Hidráulico Didático

A geometria utilizada para representar o circuito hidráulico didático engloba o domínio de fluido bifásico (ar / água) para que o modelo *CFD* seja capaz de avaliar a elevação da interface entre as fases. Dessa forma, o nível d'água na chaminé está representado por essa interface ar / água.

A malha de discretização proposta para a aplicação do MVF mostrou-se adequada para as condições definidas pelas medições M1 e M2. Isto pode ser verificado pelos valores do diagnóstico de malha do *Solver do software* “Ansys CFX” (Tabela 09). Além disso, essa malha apresenta os valores médios de y^+ de 142 e 127, respectivamente para M1 e M2, o que valida o modelo de turbulência e a aproximação da função de parede, dado que estão dentro do intervalo recomendado pelo fabricante do *software*, entre 30 e 500.

A escolha do passo no tempo ($\Delta t = 0,1$ s) também se mostrou adequada, uma vez que a simulação fornece um número de Courant limitado a 5, para ambos os casos, lembrando que o tamanho máximo do elemento está limitado a 15 mm.

O modelo bifásico homogêneo utilizado garantiu a não necessidade de se trabalhar com malha móvel para avaliar a oscilação de massa, o que tornaria o modelo de simulação mais complexo e computacionalmente mais custoso.

O comportamento estável e convergente da simulação pode ser verificado pela análise da evolução dos resíduos RMS do processo iterativo das equações de balanço de massa, de quantidade de movimento e de “ $k - \varepsilon$ ” no domínio do fluido para a condição M1, apresentados nas Figuras 18 a 20.

A série completa das figuras com os resultados relativos ao processo de análise de convergência das simulações está apresentada no Apêndice A.

Figura 18 – (M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 19 – (M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 20 – (M1) Evolução do balanço de massa de água e ar (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

O nível d'água na chaminé de equilíbrio pode ser avaliado por meio de superfície *IsoSurface* construída a partir dos elementos da malha que possuem o mesmo valor para a variável fração volumétrica de água (ANSYS, 2013e).

Para uma dada superfície *IsoSurface* relaciona-se o nível d'água com o valor médio da elevação (Y) de cada elemento de malha que constitui essa superfície.

A elevação (Y) de cada elemento refere-se à distância medida em metros desse elemento à linha de centro da tubulação no trecho a montante da chaminé de equilíbrio.

As Figuras 21 e 23 indicam a região do domínio do fluido que está preenchida com água (azul), onde a variável “fração volumétrica de água” foi utilizada para definir a interface entre as fases ar / água (linha vermelha).

Dessa forma, os resultados das Figuras 22 e 24 apresentam a oscilação de nível da *IsoSurface* definida para o valor de fração volumétrica de água igual a 0,5.

O nível d'água do reservatório considerado na geometria estudada é de 1,03 m acima da linha de centro do conduto adutor, conforme procedimento experimental. Esta elevação representa o nível de referência para o cálculo da variável “ z ” para as condições M1 e M2.

Figura 21 – (M1) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente

Fonte: Próprio Autor.

Da mesma forma que descrito no item anterior, os valores extremos resultantes para os níveis d'água desta aplicação *CFD* para M1 e M2 estão apresentados no item 4.2.4, onde serão comparados com os demais métodos.

Figura 22 – (M1) Nível d'Água na Chaminé Y (m) da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica de água = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=30$ s

Fonte: Próprio Autor.

Figura 23 – (M2) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente

Fonte: Próprio Autor.

Figura 24 – (M2) Nível d'Água na Chaminé Y (m) da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica de água = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=30$ s

Fonte: Próprio Autor.

4.2.4. Comparação dos Resultados Analítico, Experimental e Numérico

Neste item, todos os resultados obtidos para os níveis d'água na chaminé, nas condições M1 e M2 e pelos diferentes métodos aplicados, serão padronizados para a variável “ z ” e estão apresentados resumidamente nas Tabelas 16 e 17. Estas tabelas também indicam o coeficiente de perda de carga “ F ” e a velocidade inicial “ v_0 ” do escoamento em regime permanente, por tratar-se de parâmetros importantes nesse tipo de análise.

Além disso, as siglas indicadas nestas tabelas referem-se aos seguintes métodos aplicados:

TEO: aplicação da teoria com solução analítica;

NBR: aplicação dos critérios definidos pela norma NBR12596;

EXP: resultados com dados de medições experimentais;

NUM (1D): aplicação do método de diferenças finitas (Pressel);

CFD (3D): aplicação da fluidodinâmica computacional.

As Tabela 16 e 17 compilam os resultados obtidos pelos processos propostos para a condição definida pela Medição M1 e M2, respectivamente, do circuito hidráulico do CTH.

Tabela 16 – (M1) Quadro resumo com resultados:
Teoria, NBR12596, Experimental, Numérico (1D) e CFD (3D)

	TEO	NBR	EXP	NUM (1D)	CFD (3D)
$F \text{ (s}^2\text{/m)}$	0,18	0,18	0,18	0,18	--
$v_0 \text{ (m/s)}$	1,79	1,79	1,79	1,79	1,79
$z_0 \text{ (m)}$	-0,59	-0,59	-0,59	-0,59	-0,43
$z_1 \text{ (m)}$	0,75	0,75	0,65	0,77	0,82
$z_2 \text{ (m)}$	-0,50	-0,51	-0,41	-0,54	-0,55
$z_3 \text{ (m)}$	0,38	--	0,31	0,43	0,42
$T \text{ (s)}$	13,2	13,2	13,2	13,2	13,5

Tabela 17 – (M2) Quadro resumo com resultados:
Teoria, NBR12596, Experimental, Numérico (1D) e CFD (3D)

	TEO	NBR	EXP	NUM (1D)	CFD (3D)
$F \text{ (s}^2\text{/m)}$	0,18	0,18	0,18	0,18	--
$v_0 \text{ (m/s)}$	1,53	1,53	1,53	1,53	1,53
$z_0 \text{ (m)}$	-0,43	-0,43	-0,43	-0,43	-0,33
$z_1 \text{ (m)}$	0,68	0,68	0,59	0,70	0,73
$z_2 \text{ (m)}$	-0,47	-0,48	-0,38	-0,51	-0,43
$z_3 \text{ (m)}$	0,36	--	0,29	0,41	0,39
$T \text{ (s)}$	13,2	13,2	13,0	13,2	13,5

Os resultados apresentados para a formulação teórica, aplicação da norma, medições experimentais, método numérico (1D) e simulação CFD (3D) estão compatíveis entre si. Este fato confirma a semelhança do fenômeno físico que eles estão representando, pois todos eles são formulados para resolver o caso de um circuito hidráulico simples com chaminé simples de seção constante.

As pequenas diferenças do nível d'água na simulação CFD, quando se compara com os valores teóricos, dizem respeito à diferença no valor do coeficiente de perda de carga F considerado entre eles, uma vez que a condição de “parede lisa” foi configurada no modelo CFD. Ressalta-se que, nos demais cálculos, utilizou-se um coeficiente de atrito “ f ” que considera o escoamento em regime turbulento para tubos com paredes rugosas.

4.3. CIRCUITO HIDRÁULICO DO ESTUDO DE CASO

4.3.1. Solução Analítica e aplicação das Diretrizes apresentadas na norma NBR12596

A apresentação desses resultados pode ser vista no item 3.3, juntamente com a apresentação das características hidráulicas do circuito envolvendo a chaminé de equilíbrio do estudo de caso.

O item 4.3.4 apresenta novamente e de modo comparativo os resultados da solução analítica e da aplicação das diretrizes da norma NBR12596.

4.3.2. Método de Pressel Aplicado ao Estudo de Caso

A técnica de diferenças finitas (1D) aplicada para resolver a oscilação d'água na chaminé de equilíbrio resulta nas curvas das Figura 25 e 26 para as condições hidráulicas definidas nos Casos 1 e 2, respectivamente.

Os valores extremos para os níveis d'água estão apresentados no item 4.3.4.

Figura 25 – (Caso 1) Nível d'Água na Chaminé z (m) - Método de Pressel

Fonte: Próprio Autor.

Figura 26 – (Caso 2) Nível d'Água na Chaminé z(m) - Método de Pressel

Fonte: Próprio Autor.

4.3.3. Fluidodinâmica Computacional Aplicada ao Estudo de Caso

A geometria utilizada para representar o circuito hidráulico do estudo de caso engloba o domínio de fluido bifásico (ar / água) para que o modelo *CFD* seja capaz de avaliar a elevação da interface entre as fases. Dessa forma, o nível d'água na chaminé está representado por essa interface ar / água.

A malha de discretização proposta para a aplicação do MVF mostrou-se adequada para as condições definidas pelos Casos 1 e 2. Isto pode ser verificado pelos valores do diagnóstico de malha do software CFX Solver (Tabela 15).

A escolha do passo no tempo ($\Delta t = 0,25$ s) mostrou-se adequada, uma vez que a simulação fornece um número de Courant limitado a 4, para ambos os casos, lembrando que o tamanho máximo do elemento é limitado a 25 mm.

O modelo bifásico homogêneo utilizado garantiu a não necessidade de se trabalhar com malha móvel para avaliar a oscilação de massa, o que tornaria o modelo de simulação mais complexo e computacionalmente mais custoso.

O comportamento estável e convergente da simulação pode ser verificado pela análise da evolução dos resíduos RMS do processo iterativo das equações de balanço de massa, de quantidade de movimento e de “ $k - \varepsilon$ ” no domínio do fluido para o Caso 1, apresentados nas Figuras 27 a 29.

A série completa das figuras com os resultados relativos ao processo de análise de convergência das simulações está apresentada no Apêndice A.

Figura 27 – (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 28 – (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – (Caso 1) Evolução do balanço de massa de água (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

O nível d'água na chaminé de equilíbrio pode ser avaliado por meio de superfície *IsoSurface* construída a partir dos elementos da malha que possuem o mesmo valor para a variável fração volumétrica de água (ANSYS, 2013e).

Para uma dada superfície *IsoSurface* relaciona-se o nível d'água com o valor médio da elevação (Y) de cada elemento de malha que constitui essa superfície.

A elevação (Y) de cada elemento refere-se à distância medida em metros desse elemento à linha de centro da tubulação no trecho a montante da chaminé de equilíbrio.

As Figuras 30 e 32 indicam a região do domínio do fluido que está preenchida com água (azul), onde a variável “fração volumétrica de água” foi utilizada para definir a interface entre as fases ar / água (linha vermelha)

Dessa forma, os resultados das Figuras 31 e 33 apresentam a oscilação de nível da *IsoSurface* definida para o valor de fração volumétrica de água igual a 0,5.

O nível d'água do reservatório considerado na geometria estudada é de 12,40 m acima da linha de centro do conduto adutor. Esta elevação representa do nível de referência para o cálculo da variável “ z ” para os Casos 1 e 2.

Figura 30 – (Caso 1) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente

Fonte: Próprio Autor.

Figura 31 – (Caso 1) Nível d'Água na Chaminé Y (m) da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica da água = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=60s$

Fonte: Próprio Autor.

Figura 32 – (Caso 2) Fração volumétrica de água (%) com indicação da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica de água = 0,5 na condição inicial em regime permanente

Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 – (Caso 2) Nível d'Água na Chaminé Y (m) da superfície *IsoSurface* com fração volumétrica da água de = 0,5 na condição de escoamento transitório no intervalo $\Delta t=60s$.

Fonte: Próprio Autor.

4.3.4. Comparação dos Resultados Analítico e Numérico

Neste item, todos os resultados obtidos para os níveis d'água na chaminé, nos Casos 1 e 2 e pelos diferentes métodos aplicados, serão padronizados para a variável “ z ” e estão apresentados resumidamente nas Tabelas 18 e 19. Estas tabelas também indicam o coeficiente de perda de carga “ F ” e a velocidade inicial “ v_0 ” do escoamento em regime permanente, por tratar-se de parâmetros importantes nesse tipo de análise.

Além disso, as siglas indicadas nestas tabelas referem-se aos seguintes métodos aplicados:

TEO: aplicação da teoria com solução analítica;

NBR: aplicação dos critérios definidos pela norma NBR12596;

NUM (1D): aplicação do método diferenças finitas (Pressel);

CFD (3D): aplicação da fluidodinâmica computacional.

As Tabelas 18 e 19 compilam os resultados obtidos pelos processos propostos para as condições definidas pelos Casos 1 e 2, respectivamente, do circuito hidráulico do estudo de caso.

Tabela 18 – (Caso 1) Quadro resumo com resultados:
Teoria, NBR12596, Numérico (1D) e CFD (3D)

	TEO	NBR	NUM	CFD
$F \text{ (s}^2\text{/m)}$	0,04	0,04	0,04	--
$v_0 \text{ (m/s)}$	2,00	2,00	2,00	2,00
$z_0 \text{ (m)}$	-0,18	-0,18	-0,18	-0,72
$z_1 \text{ (m)}$	1,07	1,07	1,09	0,46
$z_2 \text{ (m)}$	-0,91	-0,93	-0,94	-0,18
$z_3 \text{ (m)}$	0,79	--	0,83	--
$T \text{ (s)}$	41,5	41,5	41,5	45,4

Tabela 19 – (Caso 2) Quadro resumo com resultados:
Teoria, NBR12596, Numérico e CFD

	TEO	NBR	NUM	CFD
$F \text{ (s}^2\text{/m)}$	0,04	0,04	0,04	--
$v_0 \text{ (m/s)}$	3,00	3,00	3,00	3,00
$z_0 \text{ (m)}$	-0,40	-0,40	-0,40	-1,21
$z_1 \text{ (m)}$	1,53	1,53	1,54	0,47
$z_2 \text{ (m)}$	-1,22	-1,23	-1,25	-0,22
$z_3 \text{ (m)}$	1,01	--	1,06	--
$T \text{ (s)}$	41,5	41,5	41,5	44,8

Os resultados apresentados para a formulação teórica, aplicação da norma, medições experimentais, método numérico (1D) estão compatíveis entre si. Novamente, este fato confirma a semelhança do fenômeno físico que eles estão representando, pois todos eles são formulados para resolver o caso de um circuito hidráulico simples com chaminé simples de seção constante.

As grandes diferenças do nível d'água na simulação CFD, quando se compara com os valores teóricos, dizem respeito à diferença no fenômeno físico que eles estão representando.

O resultado que emprega o valor calculado de “ F ” (TEO, NBR e NUM) considera um circuito hidráulico simples, porém a chaminé possui uma garganta ou estreitamento na sua base. Este fato modifica as perdas de carga que o fenômeno oscilatório estará sujeito, resultando em níveis d'água do modelo CFD diferentes daqueles previsto pela teoria que emprega uma chaminé simples de seção reta. Lembrando que o modelo CFD consegue captar os efeitos da “garganta” na determinação de “ F ”.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta os estudos que envolvem formulação numérica, método numérico 1D, emprego de critérios de norma técnica e simulação 3D, sendo que essa última emprega a técnica numérica de Fluidodinâmica Computacional (CFD), por meio do método de volumes finitos (MVF), de modo a avaliar a oscilação de massa ou nível d'água no interior de Chaminé de Equilíbrio, localizada no circuito hidráulico de adução de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH).

Os resultados fornecidos pela simulação do modelo CFD proposto foram comparados com valores teóricos e com medições experimentais para o caso de um circuito hidráulico didático com chaminé de equilíbrio simples.

Neste caso, o modelo CFD proposto foi validado com a aplicação experimental. Este fato confirma o emprego da técnica de fluidodinâmica computacional na determinação de efeitos oscilatórios de massa de água.

Com uma geometria definida a partir de características médias de projetos de PCHs no Brasil, uma modelagem do problema do estudo de caso foi realizada e a simulação numérica 3D empregou técnica de volumes finitos com a utilização do *software* comercial "Ansys CFX".

Essa aplicação não gerou resultados compatíveis com a teoria de chaminé do tipo simples que também é considerada na norma técnica. O fato do modelo proposto apresentar uma garganta na base da chaminé confirma a diferença nos resultados.

O método computacional se mostrou hábil para simular o fenômeno de transitório hidráulico causado pelo fechamento abrupto de válvula instalada no fim do conduto forçado à jusante da chaminé de equilíbrio. A oscilação do nível d'água na chaminé foi observada pela fração volumétrica de água, dado que o escoamento foi modelado como escoamento multifásico constituído pelos fluidos água e ar.

Assim como no caso da simulação 1D, o modelo CFD deve ser calibrado com valores adequados de coeficiente de rugosidade das paredes para uma correta avaliação do transitório.

Porém, o modelo que emprega a fluidodinâmica computacional num caso 3D mostra-se vantajoso sobre a simulação 1D, uma vez que ele será capaz de avaliar o transitório para as mais diferentes geometrias sem a necessidade de adaptar as

equações que governam o fenômeno. Este fato sugere o emprego da modelagem CFD nos projetos básicos e executivos de circuitos hidráulicos de PCHs.

Além disso, o modelo CFD leva em consideração os efeitos que são desprezados na teoria 1D, como é o caso da inércia inicial da massa d'água na chaminé, as perdas por atrito na parede da chaminé e o emprego de coeficiente de atrito variável no escoamento.

Este último fato também é um ponto chave na aplicação da teoria unidimensional, onde os coeficientes de perda de carga localizada e distribuída são determinados em experimentos sob o regime permanente e são empregados em análises de escoamentos em regime transiente.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL (2015). Resolução Normativa n. 673, de 04 de agosto de 2015. Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica - PCH. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015673.pdf>>. Acesso em: 05 de abr. de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT (1992). **Dimensionamento hidráulico de chaminés de equilíbrio para pequenas centrais hidrelétricas (PCH)**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 12596:1992, 5 p. 1992

ANDRZEJEWSKI, E. A. (2009). **Avaliações numéricas de chaminés de equilíbrio: subsídios para projetos de circuitos de geração. 2009**. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

ANSYS (2013a). **DesignModeler User's Guide**. Release 15. ANSYS, Inc. U.S.A., 2013.

ANSYS (2013b). **ANSYS Meshing User's Guide**. Release 15. ANSYS, Inc. U.S.A., 2013.

ANSYS (2013c). **ANSYS CFX-Solver Modeling Guide**. Release 15. ANSYS, Inc. U.S.A., 2013.

ANSYS (2013d). **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. Release 15. ANSYS, Inc. U.S.A., 2013.

ANSYS (2013e). **ANSYS CFD-Post User's Guide**. Release 15. ANSYS, Inc. U.S.A., 2013.

CHAUDHRY, M. H. (2014). **Applied hydraulics transients**. 3ed. 583 p. Springer-Verlag. New York, 2014.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. - ELETROBRAS (2000). **Diretrizes para estudos e projetos de pequenas centrais hidrelétricas**. Eletrobrás, 2000.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. - ELETROBRAS (2003). **Crêterios de Projeto Civil de Usinas Hidrelêtricas**. Eletrobrás, 2003.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. (2002). **Computational methods for fluid dynamics**. 3ed. Springer, 2002.

FOX, R.; PRITCHARD, P.; MCDONALD, A. (2010). **Introdução à mecânica dos fluidos**. 728 p. 7 ed. LTC, 2010.

JAEGER, C. (1977). **Fluid transients in hydro-electric engineering practice**. 413 p. Blackie, Glasgow, 1977.

LENCASTRE, A. (1983). **Hidráulica geral**. 654 p. Gráfica de Coimbra, 1983.

PORTO, R. M. (1986). **Tópicos de hidráulica aplicada**. 86 p. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

SCHREIBER, G. P (1977). **Usinas hidrelêtricas**. 238 p. Engevix, 1977.

SOUZA, P. A.; ACCORSI, P. L. (2017). **Apostila do Curso PHD 2302 Hidráulica II – Laboratório. Experiência 3: Chaminé de Equilíbrio**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

SOUZA, Z.; FUCHS, R.D.; SANTOS, A. H. M. (1983). **Centrais hidro e termelêtricas**. 241 p. Edgard Blucher, 1983.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. (2009). **Centrais hidrelêtricas**. 484 p. Acta, 2009.

STREETER, V. L.; WYLIE, E. B. (1982). **Mecânica dos fluidos**. 585 p. McGraw-Hall do Brasil, 1982.

TENNEKES, H.; LUMLEY, J. L. (1972). **A first course in turbulence**. MIT Press, Cambridge, MA, 1972.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA W. (1995). **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Longman Scientific Technical, England, 1995.

VUOLO, J. H. (1992). **Fundamentos da teoria de erros**. Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1992.

Wylie, E. B., Streeter, V. L. (1993). **Fluid transients in systems**. Prentice-Hall, 1993.

APÊNDICE A – MONITORES DO SOLVER ANSYS CFX

Os monitores dos processos de cálculo iterativos do *software* “Ansys CFX-Solver” para as simulações *CFD* realizadas no desenvolvimento deste trabalho estão apresentados nas figuras a seguir.

Esses gráficos apresentam os parâmetros avaliados nos critérios de convergência dos resíduos das equações de conservação de massa, de quantidade de movimento e do modelo de turbulência $k - \varepsilon$.

Além disso, o balanço de massa no volume de controle e a vazão mássica que escoam através das superfícies de entrada e saída também estão indicados em gráficos específicos.

Simulações Referentes à Chaminé de Equilíbrio Didática – Medições M1 e M2

Figura A1 – (M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A2 – (M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A3 – (M1) Evolução do balanço de massa de água e ar (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A4 – (M1) Evolução da vazão mássica (kg/s) nas superfícies de entrada e de saída do volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A5 – (M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=30s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,1s$, totalizando # 3000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A6 – (M1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência k- ϵ na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=30s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,1s$, totalizando # 3000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A7 – (M1) Evolução da vazão mássica (kg/s) nas superfícies de entrada e de saída na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=30s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,1s$, totalizando # 3000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A8 – (M2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A9 – (M2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ na condição de escoamento em regime permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A10 – (M2) Evolução do balanço de massa de água (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A11 – (M2) Evolução da vazão mássica (kg/s) na superfície de entrada e de saída na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A11 – (M2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=30s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,1s$, totalizando # 3000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A12 – (M2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=30s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,1s$, totalizando # 3000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A13 – (M2) Evolução da vazão mássica (kg/s) na superfície de entrada e de saída na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=30s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,1s$ (#3000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Simulações Referentes ao Circuito Hidráulico do Estudo de Caso

Figura A14 – (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A15 – (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A16 – (Caso 1) Evolução do balanço de massa de água (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A17 – (Caso 1) Evolução da vazão mássica (kg/s) na superfície de entrada e de saída na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 1000 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A18 – (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=60s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,25s$, totalizando # 2400 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A19 (Caso 1) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=60s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,25s$ (# 2400 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A20 – (Caso 1) Evolução da vazão mássica (kg/s) na superfície de entrada e de saída na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=60s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,25s$ (# 2400 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A21 – (Caso 2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 780 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A22 – (Caso 2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 780 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A23 – (Caso 2) Evolução do balanço de massa de água (%) no volume de controle na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 780 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A24 – (Caso 2) Evolução da vazão mássica (kg/s) na superfície de entrada e de saída na condição de escoamento permanente no instante inicial (# 780 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A25 – (Caso 2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) de massa e quantidade de movimento para água e ar no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=60s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,25s$, totalizando # 2400 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A26 (Caso 2) Evolução dos resíduos (erros médios RMS dos volumes finitos) do modelo de turbulência $k - \epsilon$ no volume de controle na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=60s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,25s$, totalizando # 2400 iterações)

Fonte: Próprio Autor.

Figura A27 – (Caso 2) Evolução da vazão mássica (kg/s) na superfície de entrada e de saída na condição de escoamento transitório no intervalo de tempo $\Delta t=60s$ (# 10 iterações para cada passo no tempo $\Delta t=0,25s$, totalizando # 2400 iterações)

Fonte: Próprio Autor.