

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS  
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
NÍVEL MESTRADO

SÉRGIO LEONARDO NEVES

**SIMULAÇÃO NUMÉRICA DA FORMAÇÃO DE VÓRTICES EM TOMADAS DE  
ÁGUA EM HIDRELÉTRICAS**

São Leopoldo, Junho de 2014.

Sérgio Leonardo Neves

**Simulação numérica da formação de vórtices em tomadas de água em hidrelétricas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dra Rejane de César Oliveski

Co-Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques

São Leopoldo, Junho de 2014.

N518s Neves, Sérgio Leonardo  
Simulação numérica da formação de vórtices em tomadas de  
água em hidrelétricas / Sérgio Leonardo Neves-- 2014.  
62 f. :il. color. ; 30cm.  
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Vale do Rio dos  
Sinos. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, São  
Leopoldo, RS, 2014.  
Orientadora: Profa. Dra. Rejane de César Oliveski;  
Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques.

1. Engenharia mecânica. 2. Tomada d'água. 3. Usina  
hidrelétrica. 4. Vórtice. 5. Submergência, I. Título. II. Oliveski,  
Rejane de César. II. Marques, Marcelo Giulian.

CDU 621

Catálogo na Publicação:  
Bibliotecário Eliete Mari Doncato Brasil - CRB 10/1184

Sérgio Leonardo Neves

**Simulação numérica da formação de vórtices em tomadas de água em hidrelétricas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS.

Aprovado em 05/06/2014

**BANCA EXAMINADORA**

Prof<sup>a</sup>. Dra. Edith Beatriz Camano Schettini

Prof. Dr. Conrad Yuan Yuen Lee

Prof. Dr. Paulo Roberto Wander

## **AGRADECIMENTOS**

*A realização deste projeto de mestrado exigiu muita dedicação e um somatório de esforços. Por isto, gostaria de expressar meus agradecimentos:*

*A Deus, pela vida e proteção, sempre iluminando e mostrando o melhor caminho.*

*A minha esposa Luciane e meus filhos Leonardo e Guilherme pelo incentivo a execução deste projeto, assim como sua compreensão pelo tempo que estive ausente para dedicar-me a elaboração do trabalho e estudos.*

*A minha orientadora Prof<sup>a</sup> Dra Rejane de César Oliveski, por sua dedicação, paciência e sabedoria para realização deste trabalho.*

*Ao Engenheiro Mecânico Ms Marcelo Dalla Corte pelo apoio, compartilhamento de seu conhecimento e parceria no período do projeto.*

*A FAURGS pelo apoio financeiro.*

## RESUMO

A contribuição da energia hidráulica na matriz energética nacional, segundo o Balanço Energético Nacional de 2011, é de aproximadamente 88,8%. Apesar da tendência de aumento de outras fontes energéticas, tais como: térmica, eólica, solar, tudo indica que a energia hidráulica continuará sendo, por muitos anos, a principal fonte geradora de energia elétrica do Brasil. Antes de se tornar energia elétrica, a energia hidráulica deve ser transformada em energia cinética que através de uma turbina é convertida em energia mecânica. Como último elemento do sistema, um gerador acoplado a turbina gera energia elétrica onde é distribuída aos consumidores. A eficiência de uma usina hidrelétrica pode ser afetada pelas condições de alimentação de água para sua tomada d'água. Esta operação deve ser estável, evitando distúrbios que possam interferir no desempenho do sistema. A formação de vórtices a montante das tomadas de água são causas de perda de eficiência e podem causar danos nas instalações, provocando paradas não programadas. Por isto, a formação de vórtices deve ser conhecida e evitada. O objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno de formação de vórtices em tomadas de água de hidrelétricas. Os resultados obtidos podem ser úteis para orientar projetos de novas instalações, ampliação de capacidade instalada de usinas em operação, e até mesmo para subsidiar as operações de usinas que possuem características que possam favorecer a formação de vórtices. Este trabalho faz parte do projeto ANEEL (PD-0394-0912/2011): "Formação de Vórtices em Tomadas De Água de Usinas Hidrelétricas", com patrocínio de Furnas Centrais Hidrelétricas S.A. e apoio do LAHE (Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas) e do IPH (Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul). O estudo é realizado com utilização de software comercial ANSYS-CFX, analisando diversos casos de submergência, vazão volumétrica e modelo de turbulência. O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa e quantidade de movimento, assim como de suas respectivas condições de contorno. A validação dos resultados numéricos foi realizada comparando-se este com aqueles observados no modelo experimental do IPH-UFRGS em escala de tomada de água vertical desenvolvido pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS.

Palavras-Chave: CFD, submergência, tomada d'água, usinas hidrelétricas, vórtice.

## ABSTRACT

According to the 2011 National Energy Balance the contribution of hydro energy in the national energy matrix is approximately 88.8%. Despite the increasing trend of other energy sources, such as thermal, wind and solar power, everything indicates that hydropower will remain for many years the main source of electric power in Brazil. Before becoming electricity, hydropower must be transformed into kinetic energy that through a turbine is converted into mechanical energy. As a final element of the system, coupled to a generator turbine generates electricity which is distributed to consumers. The efficiency of a hydroelectric plant may be affected by conditions of water supply to its water intake. This operation should be stable, avoiding disturbances that can affect the system performance. The formation of vortices upstream of water intakes are causes of efficiency loss and can cause damage to the premises, causing unscheduled and unplanned downtime. Therefore, the formation of vortices must be known and avoided. The objective of this work is to study the phenomenon of vortex and its formation at water intakes in a hydroelectric station. Obtaining results may be useful in guiding the design of new facilities, expansion of installed capacity of power plants in operation, and even to subsidizing the operations of plants that have characteristics that may favor the formation of vortices. This work is part of the research project: "Formation of vortices taken in water for hydroelectric plants", with sponsorship and support from the Furnas Hydroelectric Hydraulics Laboratory of Experimental Furnas-LAHE and the Institute of Hydraulic Research -IPH/UFRGS. The studies is conducted using commercial software ANSYS CFX-analyzing several cases of submergence, water flow and turbulence model. The mathematical model composed by the mass and momentum equations as well as their respective boundary conditions is applied to a model of vertical water intake. The validation of the numerical results is obtained from literature data with existing studies on water intakes and vortex formation, as well as a verification of results found in the scale model of a vertical water intake developed by the Institute of Hydraulic Research UFRGS.

Keywords: CFD, submergence, water intake, hydroelectric, vortex.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 2.1- Esquema de usina hidrelétrica. ....  | 15 |
| Figura 2.2 - Esquema de tomada d'água. ....  | 16 |
| Figura 2.3 - Esquema de tomada de água com captação vertical de descida. ....  | 17 |
| Figura 2.4 - Esquema de tomada de água com captação horizontal: (a).ligação de encaixe e (b) ligação sobreposta.....   | 18 |
| Figura 2.5 - Esquema de tomada de água com captação inclinada: (a) de descida e (b) de subida.....   | 18 |
| Figura 2.6 - Esquema de aproximação. (a) simétrica e (b) assimétrica.....  | 19 |
| Figura 3.1 - Tipos de vórtices.....  | 21 |
| Figura 3.2 – Esquema de tomada de água com indicação de submersão mínima.....  | 22 |
| Figura 3.3 - Vórtices obtidos no modelo experimental de tomada vertical assimétrica comparados com curva obtida por (JAIN, 1978). ....   | 26 |
| Figura 4.1 - Modelo experimental em escala 1:100 LOH1 do IPH.....  | 28 |
| Figura 4.2 - Modelo experimental LOH2 do IPH. ....   | 29 |
| Figura 4.3 - Modelo experimental adaptado no LAHE, FURNAS. ....  | 30 |
| Figura 4.4 - Modelo experimental adaptado no LAHE, FURNAS. ....  | 30 |
| Figura 5.1 - Esquema de estrutura do ANSYS CFX. ....   | 33 |
| Figura 5.2 - Domínio de cálculo da tomada vertical assimétrica: (a) vista em perspectiva e (b) vista lateral.....  | 34 |
| Figura 5.3 – Partes da geometria do modelo numérico tomada vertical assimétrica: (a) Parede superior, (b) Fundo, (c) Tubo, (d) Saída do tubo, (e) Entrada d'água, (f) Entrada de ar, (g) Paredes laterais, (h) Parede oposta. .... | 35 |
| Figura 5.4 - Vista lateral da tomada vertical assimétrica. ....  | 36 |
| Figura 5.5 - Vista superior da tomada vertical assimétrica. ....   | 36 |
| Figura 5.6 - Vista em perspectiva tomada vertical assimétrica. ....  | 37 |
| Figura 6.1 - Linhas de captura de variável velocidade $v$ .....  | 44 |
| Figura 6.2 - Velocidade $v$ eixo $x$ modelo numérico LOH2, para diferentes malhas espaciais. ....  | 44 |
| Figura 6.3 - Velocidade $v$ eixo $z$ modelo numérico LOH2, para diferentes malhas computacionais .....   | 45 |
| Figura 6.4 - Velocidade $v$ eixo $x$ , para diferentes $\Delta t$ .....  | 46 |
| Figura 6.5 - Velocidade $v$ eixo $z$ , para diferentes $\Delta t$ .....  | 47 |



|  |    |
|--|----|
| Figura 6.6 - Isosuperfície de $r$ e linhas de corrente, para $S = 1$ e $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ : (a) vista lateral e (b) vista superior. ....  | 49 |
| Figura 6.7 - Vista lateral de vórtice formado no modelo experimental (a), Isosuperfície de $r$ : (b) 0,50; (c) 0,60; (d) 0,70; (e) 0,80; (f) 0,90; (g) 0,95; (h) 0,98. ....  | 50 |
| Figura 6.8 - Vórtice para $S = 0,5$ e $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ , com $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico. ....  | 51 |
| Figura 6.9 - Vórtice para $S = 1$ e $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ , com $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico. ....  | 51 |
| Figura 6.10 - Vórtice para $S = 1$ e $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$ , com $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico. ....   | 52 |
| Figura 6.11 - Vórtice para $S = 1$ e $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , com $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico. ....   | 52 |
| Figura 6.12 - Vórtice $S = 1,5$ e $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérica...  | 53 |
| Figura 6.13 - Comparação de tipos de vórtice nos modelos numérico e experimental para $r = 0,5$ e $r = 0,98$ . ....  | 53 |
| Figura 6.14 - Linhas de corrente de velocidade de água para $S = 1$ : (a) $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b) $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c) $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....          | 54 |
| Figura 6.15 - Vorticidade $\gamma$ de água para $S = 1$ e $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....   | 55 |
| Figura 6.16 - Vetores de velocidade de água na saída do tubo da tomada para $S=1$ : (a) $Q= 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b) $Q= 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c) $Q= 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) $Q=0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . .... | 56 |
| Figura 6.17 - Campo de vorticidade em plano na saída do tubo para $S = 1$ : (a) $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b) $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c) $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$ e (d) $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . ....    | 57 |
| Figura 6.18 - Vorticidade média em plano na saída do tubo da tomada em relação a $Fr$ . ....   | 58 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 3.1 - Modelos para submergência relativa mínima.....               | 23 |
| Tabela 5.1 – Dimensões em metros do domínio de cálculo .                  | 34 |
| Tabela 5.2 - Condições operacionais de ensaio no modelo experimental..... | 40 |
| Tabela 6.1- Casos de simulação numérica modelo numérico LOH2. ....        | 42 |

## LISTA DE SIMBOLOS

|  |                      |
|--|----------------------|
| $A$ – área                                       | [m <sup>2</sup> ]    |
| $D$ – diâmetro                                   | [m]                  |
| $g$ – aceleração da gravidade                    | [m/s <sup>2</sup> ]  |
| $Fr$ – número de Froude                          | [ - ]                |
| $L$ – comprimento                                | [m]                  |
| $L_c$ – comprimento característico               | [m]                  |
| $\mu$ – viscosidade dinâmica                     | [Pa s]               |
| $\dot{m}$ – vazão mássica                        | [kg/s]               |
| $N_r$ – número de circulação                     | [ - ]                |
| $p$ – pressão                                    | [Pa]                 |
| $Q$ – vazão volumétrica                          | [m <sup>3</sup> /s]  |
| $r$ – fração volumétrica                         | [ - ]                |
| $Re$ – número de Reynolds                        | [ - ]                |
| $Re_r$ – número de Reynolds radial               | [ - ]                |
| $h$ – submergência                               | [m]                  |
| $H$ – altura                                     | [m]                  |
| $S$ – submergência relativa                      | [ - ]                |
| $S_M$ – termo fonte                              | [ N/m <sup>3</sup> ] |
| $t$ – tempo                                      | [s]                  |
| $u$ – componente de velocidade no eixo x         | [m/s]                |
| $U$ – vetor velocidade                           | [m/s]                |
| $v$ – componente de velocidade no eixo y         | [m/s]                |
| $V$ – velocidade média                           | [m/s]                |
| $x$ – direção do eixo horizontal                 | [ - ]                |
| $y$ – direção do eixo vertical                   | [ - ]                |
| $w$ – componente de velocidade no eixo z         | [m/s]                |
| $W$ – largura                                    | [m]                  |
| $z$ – direção do eixo perpendicular ao plano x y | [ - ]                |

## Subscritos

$\alpha$  - fração volumétrica da água

$\beta$  - fração volumétrica do ar

eff – efetivo

$\varepsilon$  - taxa de dissipação de energia cinética turbulenta

k - energia cinética turbulenta

m – mistura

REF. referência

t - turbulenta

T - tubo

## Letras gregas

$\gamma$  - peso específico

[N/m<sup>3</sup>]

$\Gamma$  - circulação

[m<sup>2</sup>/s]

$\Delta$  – diferença

[ - ]

$\rho$  – massa específica

[kg/m<sup>3</sup>]

$\mu$  - viscosidade dinâmica

[Pa s]

$\nu$  – viscosidade cinemática

[m<sup>2</sup>/s]

$\omega$  – velocidade angular

[rad/s]

$\zeta$  – vorticidade

[1/s]

$\zeta^*$  - vorticidade adimensional

[ - ]

## ABREVIATURAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

CFD - Computational Fluid Dynamics

GB – Gigabyte

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LABSIN-Laboratório de Simulação Numérica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

LAHE - Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos

LOH1 – modelo de tomada d'água em escala 1:1

LOH2 - modelo de tomada d'água em escala 1:2

RAM - memória de acesso aleatório

SST - Shear-Stress Transport

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>13</b> |
| 1.1 OBJETIVO .....  | 14        |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                       | 14        |
| <b>2 TOMADA D'ÁGUA EM USINAS HIDRELÉTRICAS .....</b>                  | <b>15</b> |
| 2.1 TIPOS DE TOMADA D'ÁGUA .....                                      | 17        |
| <b>2.1.1 Classificação quanto ao tipo de aproximação d'água .....</b> | <b>19</b> |
| <b>3 VÓRTICES .....</b>   | <b>20</b> |
| 3.1 IMPORTÂNCIA DA SUBMERGÊNCIA MÍNIMA .....                          | 22        |
| <b>4 PROJETO DE PESQUISA .....</b>                                    | <b>27</b> |
| <b>5 ABORDAGEM NUMÉRICA.....</b>                                      | <b>32</b> |
| 5.1 ANSYS CFX .....   | 32        |
| 5.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA .....                                       | 33        |
| <b>5.2.1 Geometria .....</b>  | <b>33</b> |
| <b>5.2.2 Malha Computacional.....</b>                                 | <b>35</b> |
| 5.3 MODELO MATEMÁTICO .....   | 37        |
| <b>5.3.1 Condições de Contorno, Iniciais e Operacionais .....</b>     | <b>39</b> |
| 5.4 INDEPENDÊNCIA DE MALHA TEMPORAL E ESPACIAL.....                   | 40        |
| 5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA .....                           | 41        |
| <b>6 RESULTADOS.....</b>  | <b>42</b> |
| 6.1 INVESTIGAÇÃO DAS MALHAS ESPACIAIS E TEMPORAIS .....               | 42        |
| <b>6.1.1 Malha Espacial.....</b>                                      | <b>43</b> |
| <b>6.1.2 Malha Temporal .....</b>                                     | <b>45</b> |
| 6.2 ESTUDO DE CASO .....  | 47        |
| <b>6.2.1 Regime Permanente.....</b>                                   | <b>47</b> |
| 6.3 REGIME TRANSIENTE .....   | 49        |
| <b>7 CONCLUSÃO .....</b>  | <b>59</b> |
| <b>8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>                        | <b>60</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>  | <b>61</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a principal parcela da matriz energética está baseada na hidroenergia. Conforme dados do Balanço Energético Nacional de 2011, esta participação é de aproximadamente 88,8%. Como em nosso país há um enorme potencial para exploração deste tipo de geração, pois temos riqueza de fontes hidráulicas, os projetos de geração de energia elétrica a partir de fontes hídricas naturais e renováveis devem ter um nível de desenvolvimento tecnológico para o melhor aproveitamento e eficiência.

No projeto de uma central hidrelétrica há fatores que devem ser bem conhecidos e entendidos para obtenção do melhor desempenho e rendimento, levando-se em consideração as variações de sazonalidade de períodos de chuvas e estoque estratégico de água nos reservatórios. Dentre estes fatores, a tomada d'água para alimentação das turbinas tem papel fundamental na questão de eficiência de operação das turbinas.

Como elemento fundamental em projeto de hidrelétrica, a tomada de água é uma estrutura que conduz o escoamento de rios, reservatórios, canais para o interior de condutos adutores que alimentam máquinas hidráulicas, tais como turbinas. Em usinas hidrelétricas, as tomadas de água direcionam o escoamento para o conduto forçado, alimentando as turbinas para geração de energia. As tomadas devem ser projetadas e construídas para funcionar ininterruptamente, em qualquer época do ano, e para condições de contorno previamente definidas (nível mínimo a montante e vazão máxima aduzida), permitir a retirada de água para o sistema de abastecimento em quantidade suficiente e com a melhor qualidade possível.

Na operação de centrais hidrelétricas pode ocorrer o fenômeno de formação de vórtice a montante da tomada d'água. Os vórtices formados podem arrastar ar para o interior dos dutos de alimentação das turbinas comprometendo a operação da usina. Como este efeito é prejudicial à operação e eficiência do sistema, o estudo na fase de projeto é fundamental para permitir condições que previnam a formação de vórtices.

Alguns trabalhos realizados com o mesmo objetivo de estudar a formação de vórtices em tomadas d'água foram publicados. Há casos em que compara-se resultados de modelo experimental com modelo numérico. Os estudos de GULICK et al. (2006) mostram resultados de simulação numérica com modelo não homogêneo bifásico para as frações volumétricas de ar e água. Neste trabalho foi utilizado o software comercial ANSYS-CFX com obtenção de resultados que capturaram linhas de corrente com rotação e vorticidade na isosuperfície. Neste caso, a malha computacional é hexaédrica e possui  $3 \times 10^5$  elementos.

Em NAKAYAMA e HISASUE (2010) foram realizadas simulações numéricas com utilização de *Computational Fluid Dynamics* CFD. O domínio de cálculo representou uma tomada de água vertical simétrica com aproximação por canal. Os resultados sugerem vorticidade nos resultados observados nas linhas de corrente, vetores de velocidade na isosuperfície, mas não mostram a formação do vórtice propriamente dita.

O estudo de GASKIN (2009), com foco no mecanismo de aproximação da tomada d'água, relaciona sua influência na formação de vórtice. Este trabalho foi realizado em modelo experimental e numérico. Oito condições operacionais de submergência e vazão volumétrica foram utilizados. Os resultados obtidos em modelo numérico com utilização de CFD apresentaram vorticidade no campo de velocidades.

No trabalho de CHEN (2012) foi realizada simulação numérica em modelo tridimensional investigando o modelo de turbulência  $k - \epsilon$ . São analisados os efeitos da energia cinética turbulenta, a taxa de dissipação turbulenta na formação de vórtices em tomada d'água vertical comparando modelos de turbulência  $k - \epsilon$  padrão e  $k - \epsilon$  RNG. Os resultados obtidos no modelo numérico onde houve vorticidade nas linhas de corrente concordaram com o modelo experimental.

## 1.1 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é reproduzir numericamente o fenômeno de formação de vórtices em tomadas d'água de hidrelétricas e, com isso, contribuir para orientação de projetos de novas instalações, ampliação de capacidade instalada de usinas hidrelétricas em operação no sentido de prever a formação de vórtices.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são: desenvolver um modelo que seja capaz de reproduzir numericamente a formação de vórtice; fazer um estudo de caso com diferentes condições operacionais de vazão e submergência.



## 2 TOMADA D'ÁGUA EM USINAS HIDRELÉTRICAS

Neste capítulo será apresentada a revisão dos tópicos relevantes deste trabalho em relação aos principais componentes de uma usina hidrelétrica em especial atenção aos tipos e função da tomada d'água a montante da turbina.

A energia elétrica em uma hidrelétrica é produzida com base na energia hidráulica, ou seja, pelo aproveitamento da energia potencial gravitacional da água contida em uma represa elevada. Esta energia está presente na natureza e pode ser aproveitada em desníveis acentuados ou quedas de água.

Antes de se tornar energia elétrica, a energia potencial e cinética da água deve ser convertida em energia mecânica. O dispositivo que realiza esta transformação é a turbina. A turbina consiste basicamente em uma roda dotada de pás, que é posta em rotação ao receber a massa de água transformando a energia cinética em energia mecânica. O último elemento deste sistema de transformações é o gerador, que converte o movimento rotatório da turbina em energia elétrica. Esta energia então alimenta um sistema de distribuição para os consumidores.

O sistema de captação (Fig. 2.1) até a chegada à turbina é composto por um rio, lago, canais, reservatório e por uma tomada d'água que tem a função de conduzir o fluxo de forma uniforme até a sucção da máquina hidráulica ou turbina.



Figura 2.1- Esquema de usina hidrelétrica.

Fonte:[http://cidadedetucurui.com/inicio/usina\\_hidreletrica\\_tucurui/USINA\\_HIDRELETRICA\\_TUCURUI.htm](http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm) Acesso em: 16 jan 2013

As tomadas (Fig. 2.2) são divididas em dois tipos conforme Jones (2008), e podem ter o duto de aspiração vertical ou horizontal. O projeto de uma tomada de água quanto ao dimensionamento e posicionamento é fundamental para o correto funcionamento do sistema em relação a submersão mínima.

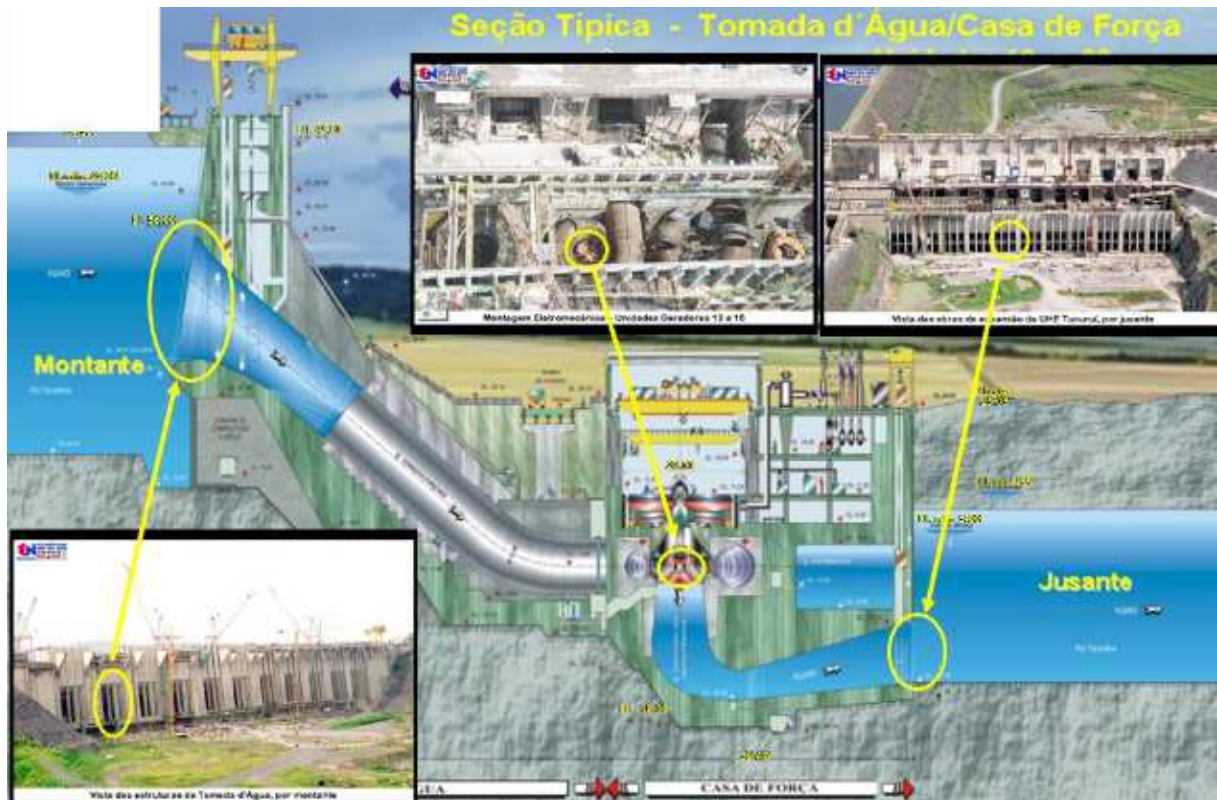


Figura 2.2 - Esquema de tomada d'água.

Fonte: [http://cidadedetucurui.com/inicio/usina\\_hidreletrica\\_tucurui/USINA\\_HIDRELETRICA\\_TUCURUI.htm](http://cidadedetucurui.com/inicio/usina_hidreletrica_tucurui/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm) Acesso em: 16 jan 2013

Os efeitos de um projeto com deficiência no posicionamento ou dimensionamento da tomada de água ou com baixa submersão podem gerar fenômenos de formação de vórtices e arraste de ar para o duto de sucção da turbina com sérios danos por vibrações e erosão no próprio duto de sucção e componentes da turbina. Além destes, pode ocorrer perda de carga em caso de subdimensionamento por aumento da velocidade da água pelo duto de sucção da turbina reduzindo sua eficiência.

As formas da estrutura de tomada de água, quando a velocidade de escoamento através da mesma é elevada, são definidas de modo a que as variações locais de pressão que ocorrem não provoquem pressões próximas da pressão de vapor da água, no sentido de evitar a ocorrência de cavitação e a consequente erosão das paredes da estrutura (RAMOS, 2000).

Também deve-se evitar assimetria do escoamento de água na região de entrada da tomada pois esta assimetria pode favorecer a formação de vórtices. Estes efeitos podem reduzir a eficiência da instalação na geração de energia elétrica.

Um componente necessário é a grelha que evita a entrada de detritos assim como uma câmara de sedimentação para acumular areia, cascalho, seixos onde são eliminados por uma corrente de derivação de varredura com descarga independente do sistema principal. (Adaptado de RAMOS, 2000 e ESHA, 2004).

Em um projeto de instalação de tomada de água em uma hidrelétrica deve-se buscar o ponto ótimo para obtenção de uma submersão mínima requerida para evitar a formação de vórtices aliado a redução de custo de construção da obra, pois quanto maior a submersão disponível, maior será a necessidade de profundidade do lago ou represamento limitado pela topografia, ecologia, área inundada.

## 2.1 TIPOS DE TOMADA D'ÁGUA

A posição de captação da tomada de água tem influência na formação de vórtices (KNAUSS, 1987). As tomadas de água podem ser classificadas conforme o tipo de posição de direcionamento do fluxo a montante da turbina e podem ser vertical de descida ou subida (Fig. 2.3), horizontal (Fig. 2.4) e horizontal inclinada de descida ou subida (Fig. 2.5).

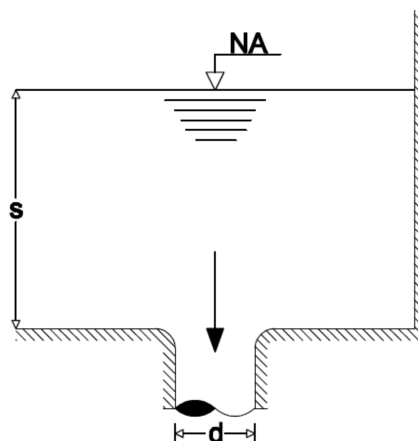


Figura 2.3 - Esquema de tomada de água com captação vertical de descida.  
(Fonte: Adaptado de KNAUSS, 1987)

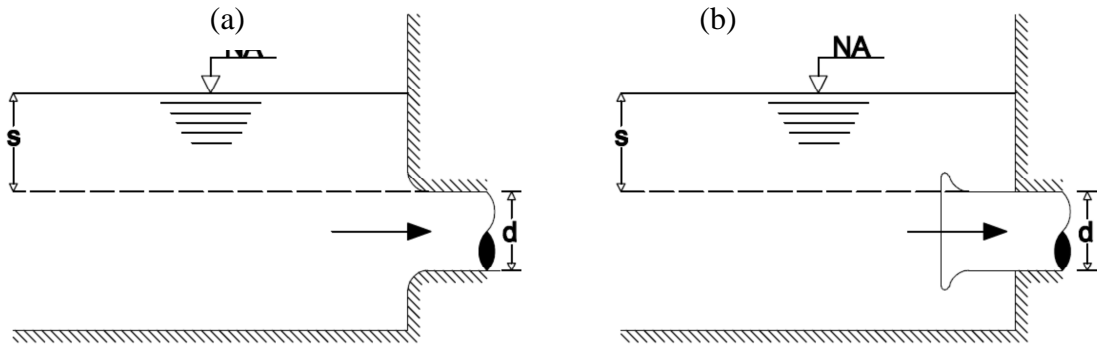


Figura 2.4 - Esquema de tomada de água com captação horizontal: (a).ligação de encaixe e (b) ligação sobreposta  
(Fonte: Adaptado de KNAUSS, 1987)

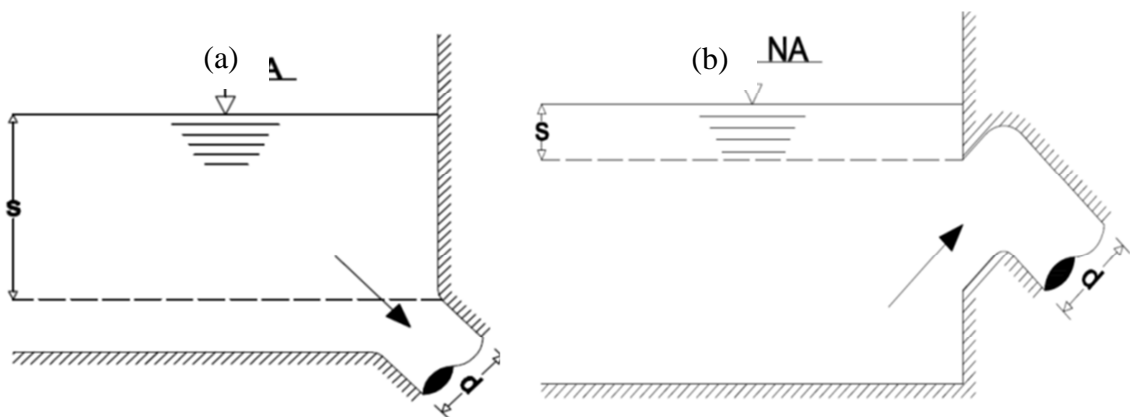


Figura 2.5 - Esquema de tomada de água com captação inclinada: (a) de descida e (b) de subida.  
(Fonte: Adaptado de KNAUSS, 1987)

Quanto aos tipos em relação à topografia, hidrologia e características da fonte de água, as tomadas de água podem ser classificadas em tipo lateral, frontal e inferior. As laterais são adequadas para rio em curva, com vantagem de evitar que material sólido entre na tomada. Estas tomadas tiram proveito da presença de fortes correntes secundárias ao longo da curva exterior do trecho de rio, uma vez que permitem evitar que material sólido do leito entre na tomada de água (PEREIRA, 2010). As tomadas de tipo frontal, adequadas para serem implantadas em rios de perfil retilíneo permitem operar com grandes quantidades de material sólido do leito e em suspensão. Contudo, necessitam de descarga contínua de seu túnel de sedimentação para remoção e limpeza o que implica em perdas de água constantes (ESHA, 2004). A tomada de tipo inferior é geralmente implantada em trechos retilíneos de pequenos cursos de água de declive acentuado, como torrentes de montanha que transportam grande quantidade de detritos e de pedras. Estas tomadas são compostas por um canal construído transversalmente ao leito e coberto por uma grelha de declive superior ao do leito. A grelha

permite separar detritos e peixes do fluxo a derivar para o circuito hidráulico (PEREIRA, 2010).

### 2.1.1 Classificação quanto ao tipo de aproximação d'água

A configuração das linhas de corrente na tomada d'água podem ser simétricas ou assimétricas, conforme pode ser visto nas Fig. 2.6(a-b), respectivamente. A assimetria pode gerar rotação no fluxo de água induzindo a formação de vórtices conforme, HECKER (1981).

A excentricidade entre a aproximação do fluxo e a tomada d'água pode estimular a formação de circulação e turbilhão. Esta circulação pode gerar vórtices prejudiciais às instalações KNAUSS (1987).

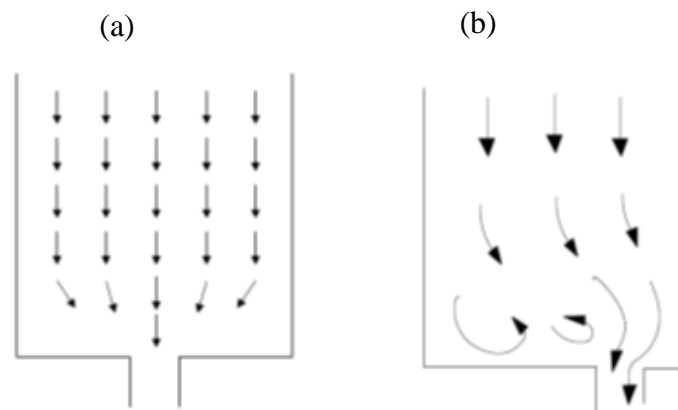


Figura 2.6 - Esquema de aproximação. (a) simétrica e (b) assimétrica.  
(Fonte: Adaptado de KNAUSS, 1987)

### 3 VÓRTICES

Para um rendimento máximo do sistema de geração de uma hidrelétrica, a distribuição do escoamento a montante da turbina deve ser maximizada. Este problema não é de fácil solução devido à mudança de geometria dos componentes entre o reservatório e a turbina. Estas alterações geométricas podem facilitar a separação do escoamento, induzindo a formação de vorticidade. Manter a distribuição do escoamento uniforme é muitas vezes de difícil controle, uma vez que a forma da secção do escoamento a montante é continuamente alterada, como por exemplo a partir de um canal prismático na entrada, para uma seção retangular na tomada, e por fim para uma seção circular, já no duto forçado (ASCE, 1995).

Vórtice pode ser definido como a circulação de escoamento, por unidade de área, e formam padrões de escoamento turbulento. Estes padrões podem ser instáveis ou estáveis e podem ocorrer na superfície ou submersos, arrastando ar da superfície ou ar dissolvido (ASCE, 1995). A vorticidade é uma grandeza vetorial e fisicamente representa a tendência de um elemento fluido de girar em torno de seu eixo.

A classificação dos vórtices em relação ao tipo de núcleo pode ser dividida em dois tipos: forçado com núcleo de fluido e livre com núcleo de ar. Este último tem características e efeitos prejudiciais superiores em relação ao forçado. Os vórtices são causados por uma aceleração não-uniforme do escoamento. As perturbações que alteram a uniformidade da velocidade podem gerar vorticidade.

Segundo RAMOS (2000), a formação de vórtices é dependente da geometria de aproximação e da submersão mínima. Já ASCE (1995) diz que esta questão é também dependente de outros fatores, os quais seriam: condições de aproximação assimétricas; irregularidades na geometria da superfície, submersão inadequada, separação do escoamento, formação de turbulência e velocidades de aproximação elevadas.

A formação de vórtices em tomadas de água pode acarretar, frequentemente, perda de eficiência hidráulica em uma instalação de geração de energia hidrelétrica devido a perturbações no escoamento da água. A formação de vórtices tem ainda as seguintes consequências: dá origem a condições de escoamento não uniformes; promove a entrada de ar no escoamento; potencializa a formação de condições de operação adversas para as turbomáquinas hidráulicas causando vibração, cavitação e pressões diferenciadas, que podem induzir liberação do ar aprisionado, originando condições de escoamento bolhoso, e sobrepressões elevadas que podem levar ao colapso da conduta forçada; arrasta detritos

sólidos para a tomada de água, que conduzem à obstrução das grelhas aumentando as perdas de carga e diminuindo a eficiência hidráulica e energética (ASCE, 1995).

Conforme PADMANABHAN e HECKER (1984), os vórtices podem ser classificados conforme sua intensidade, como mostrados na Fig. 3.1. Os vórtices que devem ser evitados em instalações de usinas hidrelétricas são os de tipo 3, 4, 5 e 6. O vórtice de tipo 3 é de menor intensidade, pois não induz um arraste de ar em seu núcleo até a tomada de água, mas impõem um pequeno efeito em perda de rendimento na geração de energia. O vórtice tipo 6 é o mais intenso e prejudicial, pois seu núcleo é completamente desenvolvido até a tomada de água com presença de ar interferindo no escoamento de água e causando danos ao sistema e turbomáquina a jusante.



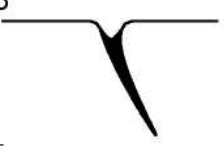
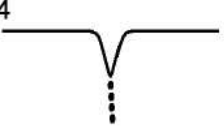
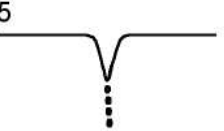
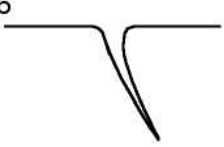
| Tipo de vórtice  | Descrição  |
|--|--|
| 1<br>   | Rotação superficial sem depressão                    |
| 2<br> | Depressão superficial                                |
| 3<br> | Núcleo sem presença de ar                            |
| 4<br> | Sucção de partículas flutuantes, mas não ar          |
| 5<br> | Bolhas de ar engolidas pela tomada                   |
| 6<br> | Núcleo de ar completamente desenvolvido até a tomada |

Figura 3.1 - Tipos de vórtices.

(Fonte: J. Hydraul. Eng. 1984.110:1540-1556)

### 3.1 IMPORTÂNCIA DA SUBMERGÊNCIA MÍNIMA

O parâmetro mais importante a ser estudado no fenômeno de formação de vórtices é a altura de coluna de água acima da geratriz superior da tomada d'água, denominada submergência mínima ( $h$ ), (Figura 3.2).

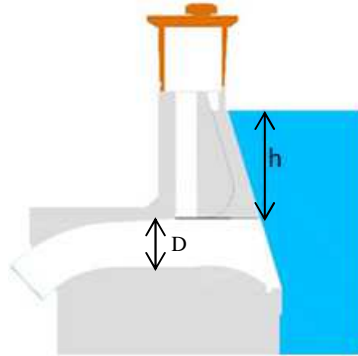


Figura 3.2 – Esquema de tomada de água com indicação de submergência mínima.  
(Fonte: Saraiva et al., 2013)

Em ASCE (1995), definir a submergência adequada da tomada de água, assim como evitar velocidades e geometrias que possam causar separação do escoamento são formas mais simples de evitar formação de vórtice.

A submergência mínima tem papel fundamental na prevenção de formação de vórtices, pois minimiza a velocidade superficial e o potencial para desenvolvimento de turbulência. A submergência requerida depende das condições de aproximação, da orientação da tomada de água, da velocidade na seção de entrada da mesma, e da dimensão característica (diâmetro) da tomada de água (ASCE, 1995).

A submergência ( $h$ ) está relacionada a diversos fatores, tais como: diâmetro da tomada d'água ( $D$ ), velocidade média no interior do duto, ângulo de aproximação do fluxo e números de Froude ( $Fr$ ), Reynolds ( $Re$ ) e Weber ( $We$ ) do escoamento. Uma forma bastante utilizada para estudo de submergência é através da sua adimensionalização com o diâmetro da tomada, chamada de submergência relativa mínima, conforme pode ser visto na Eq. 3.1:

$$S = \frac{h}{D}, \quad (3.1)$$



onde  $S$  é a submergência relativa mínima,  $h$  é a submergência mínima e  $D$  é o diâmetro da tomada d'água.

Os custos de implantação de usinas hidrelétricas são diretamente proporcionais a submergência relativa mínima. Isto quer dizer que: de maneira geral, quanto mais próxima da superfície livre do reservatório estiver localizada a tomada d'água, maior será a economia na construção de obra. Porém, quanto menor for  $S$ , maior será a chance de ocorrência de vórtices. Dessa forma, determinar o nível mínimo de água acima da tomada é de extrema importância, já que tem peso determinante em termos econômicos e de desempenho.

Na literatura especializada a submergência relativa mínima é abordada por vários autores. Na Tab. 3.1 são apresentadas fórmulas propostas para esta definição,

Tabela 3.1 - Modelos para submergência relativa mínima.

|                       |  |
|-----------------------|--|
| AFNOR E44-203 (1989)  | $S = 1,5D; F_r < 0,5$<br>$S = (0,5 + 2F_r)D; F_r > 0,5$                    |
| BLEISDELL (1982)      | $S = 1,7F_r$ para tomada simétrica<br>$S = 2,2F_r$ para tomada assimétrica |
| GORDON (1970)         | $S = KV\sqrt{D}$   |
| GULLIVER et al (1986) | $S = D(1,7 + F_r)$   |
| HECKER (1981)         | $S = D(0,5 + 2,3F_r)$  |
| KNAUSS (1987)         | $S = 2DF_r$ para $S \geq D$  |
| PROSSER (1977)        | $S > 1,5D$   |

onde  $V$  é a velocidade no interior da conduta a jusante,  $D$  é o diâmetro da entrada do duto da tomada, e  $K$  é um coeficiente que toma o valor 0,3 no caso de se verificar um escoamento de aproximação simétrico, e 0,4 para condições de aproximação assimétricas.  $F_r$  é número de Froude, definido por:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}, \quad (3.2)$$

onde  $g$  é a aceleração da gravidade.

Um problema enfrentado nos estudos de formação de vórtice em modelos experimentais é o efeito de escala. Nos casos de redução em escala dos modelos, não é possível a redução de alguns fatores do protótipo. Os fatores para este problema são a tensão superficial e efeitos de viscosidade. Por isto são usados parâmetros adimensionais que tem importância para determinar as equações de movimento para vórtice. Algumas aproximações tem sido usadas por um número de investigadores. LEWELLEN (1962) identificou parâmetros adimensionais relevantes, tais como: submergência relativa mínima ( $S$ ), números de circulação ( $N_\Gamma$ ) e de Reynolds radial ( $R_R$ ), apresentados nas Eq. (3.3-3.4), respectivamente.

$$N_\Gamma = \Gamma \frac{D}{Q}, \quad (3.3)$$

$$R_R = \frac{Q}{\nu h}, \quad (3.4)$$

onde  $\Gamma$  é a circulação,  $\nu$  é a viscosidade cinemática,  $h$  a submergência da tomada e  $Q$  a vazão volumétrica.

Outro adimensional importante é o número de Weber ( $We$ ) o qual relaciona as forças de inércia com as forças de tensão superficial (KNAUSS, 1987).

$$We = V \sqrt{\frac{\rho D}{\sigma}}, \quad (3.5)$$

onde  $\rho$  é a massa específica e  $\sigma$  a tensão superficial. Testes realizados por ANWAR et al. (1978), DAGGET e KEULEGN (1974), e JAIN e RAJU (1978) tendem a mostrar que a tensão superficial tem mínimo efeito em vórtices para número de Weber  $> 10^4$ . Outro adimensional que deve ser conhecido é o número de Reynolds ( $Re$ , Eq. 3.6), tanto no reservatório quanto no duto da tomada d'água. O número de Reynolds está dado por:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3.6)$$

Em relação ao número de Reynolds no interior do duto da tomada d'água, este tem valor crítico de  $3 \times 10^4$  (ANWAR et al. 1978). A vorticidade pode ser definida pela Eq. 3.7:

$$\xi = 2\omega, \quad (3.7)$$

onde  $\omega$  é velocidade angular. A vorticidade adimensional é expressa por:

$$\xi^* = \frac{\xi D}{V} \quad (3.8)$$

A Figura 3.3 apresenta resultados de submergência pelo número de Froude. A linha contínua representa os resultados obtidos por JAIN e RAJU (1978), para uma tomada vertical simétrica para baixo. Os autores sugerem que pontos situados à direita da curva indicam região onde há ocorrência de algum tipo de vórtice. Os pontos situados à esquerda da curva indicam região onde não é verificada a presença de vórtices. Os símbolos pontilhados representam os resultados experimentais obtidos no modelo do LOH/IPH (Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul) para uma tomada vertical assimétrica, em escala 1:1. Observa-se que, para  $S > 3,5$ , não há formação de vórtice independente de  $Fr$ . Também é possível verificar que com o aumento de  $Fr$  e redução de  $S$  há uma tendência de geração de vórtice tipo 6. Por outro lado, com aumento de  $S$  e redução de  $Fr$ , há uma tendência de não formação de vórtices. Há possibilidade destes resultados serem mais críticos do que aqueles obtidos por JAIN e RAJU (1978) por se tratarem de resultados obtidos em tomada vertical assimétrica.

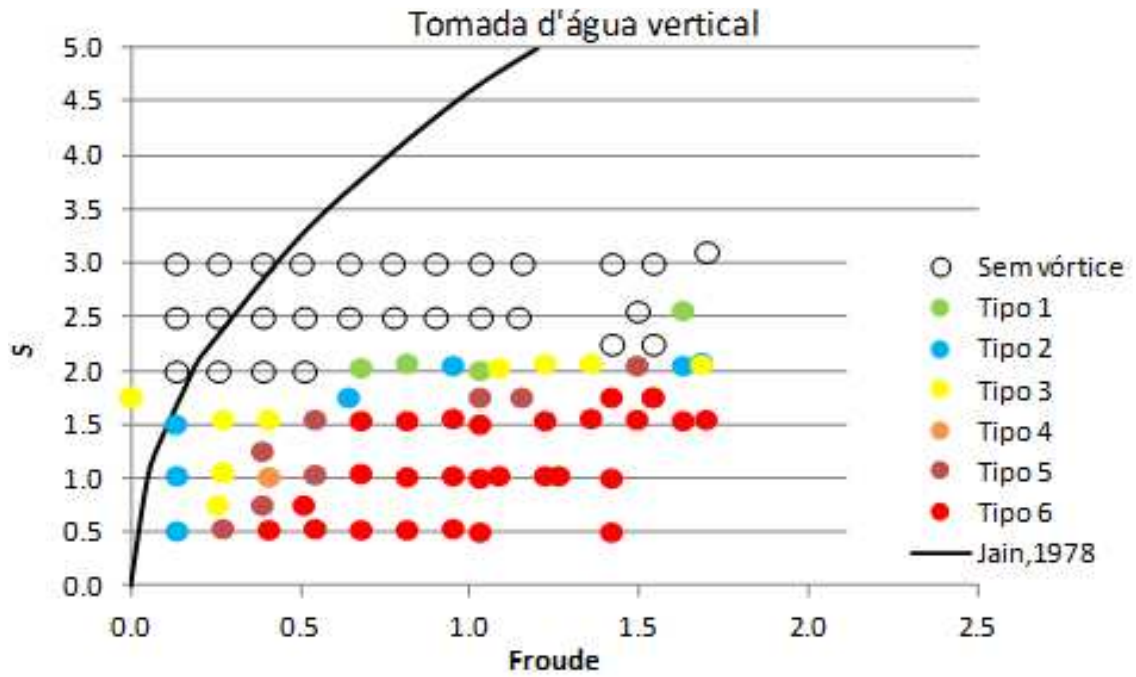


Figura 3.3 - Vórtices obtidos no modelo experimental de tomada vertical assimétrica comparados com curva obtida por (JAIN, 1978).  
(Fonte: Adaptado de Melatte et al., 2013)

## 4 PROJETO DE PESQUISA

Este trabalho de pesquisa está inserido no projeto ANEEL-PD-0394-0912/2011, intitulado “Formação de Vórtices em Tomadas de água de Usinas Hidrelétricas”, e conta com apoio de Furnas Centrais Elétricas, representada pelo Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Laboratório de Obras Hidráulicas (IPH/LOH) e Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), pelo LABSIN (Laboratório de Simulação Numérica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica).

Dois tipos de abordagens estão previstas: experimental e numérica. Para a abordagem experimental, em diferentes escalas, foram desenvolvidos dois projetos de tomada d’água pelo LOH do IPH e um pelo LAHE de Furnas.

O maior modelo (escala 1:1) do IPH denominado LOH1 contempla três tipos de tomada: horizontal simétrica, horizontal assimétrica e vertical simétrica (Fig. 4.1). Este permite a simulação de escoamentos em três tomadas d’água independentes e com condições de contorno diferentes: tomada vertical, localizada a direita do reservatório superior, portanto, assimétrica frente ao escoamento, e tomadas horizontais, uma simétrica e outra assimétrica.

A circulação de água é realizada através do uso de uma bomba centrífuga e em circuito fechado. O diâmetro das tubulações nas tomadas é de 100 mm, a vazão volumétrica é de 0,012 m<sup>3</sup>/s,  $Re$  na tomada varia entre  $1,53 \times 10^5$  e  $5,09 \times 10^4$ , o  $Fr$  entre 1,54 e 0,51 e  $We$  de 595 a 3650. Para reduzir o efeito de turbilhonamento da água, produzido na descarga da bomba, há um distribuidor de água na entrada do reservatório e dois tranquilizadores. O modelo conta com um medidor ultrassônico de nível para controle do nível a montante da tomada e de um medidor de vazão eletromagnético colocado no conduto da tomada. A operação do modelo pode ser feita de duas formas, manualmente ou no modo automático. Para a operação em modo automático, o medidor de nível envia um sinal ao inversor de frequência, que controla a bomba, e assim o nível se mantém constante.

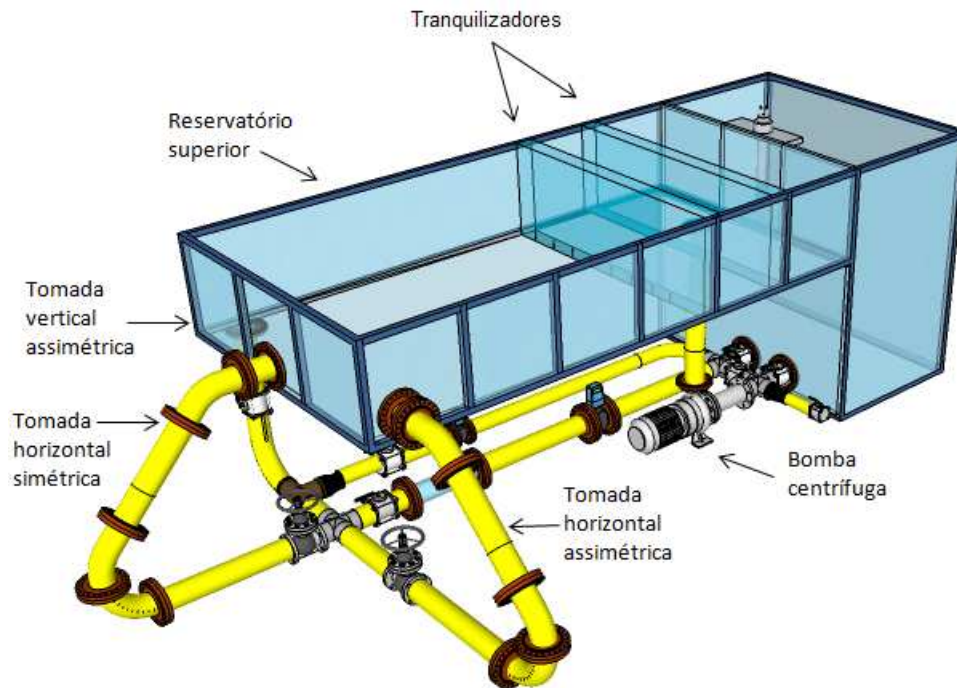


Figura 4.1 - Modelo experimental em escala 1:100 LOH1 do IPH.  
(Fonte: Melatte et al., 2013)

O outro modelo de tomada d'água experimental construído pelo IPH, denominado LOH2, possui as mesmas características de tomadas d'água vertical e horizontal, simétrica e assimétrica (Fig. 4.2), porém em escala 1:2. O diâmetro das tubulações é de 50 mm, a vazão mássica é de 0,004 m<sup>3</sup>/s,  $Re$  na tomada varia entre  $2,5 \times 10^4$  e  $10,7 \times 10^4$  e  $We$  entre 214,5 e 3913,9. Este modelo foi construído para se investigar efeitos de escala no que diz respeito aos modelos reduzidos, servindo de subsídio para o modelo numérico. Assim como no modelo de maior escala, este também conta com um distribuidor de água e um tranquilizador, instalados no reservatório de água, com o mesmo objetivo de amortecer o turbilhonamento produzido pela descarga da bomba centrífuga instalada no circuito fechado.

Este modelo serviu como ponto de partida nos ensaios de verificação de formação de vórtice com vazões e submergências distintas.

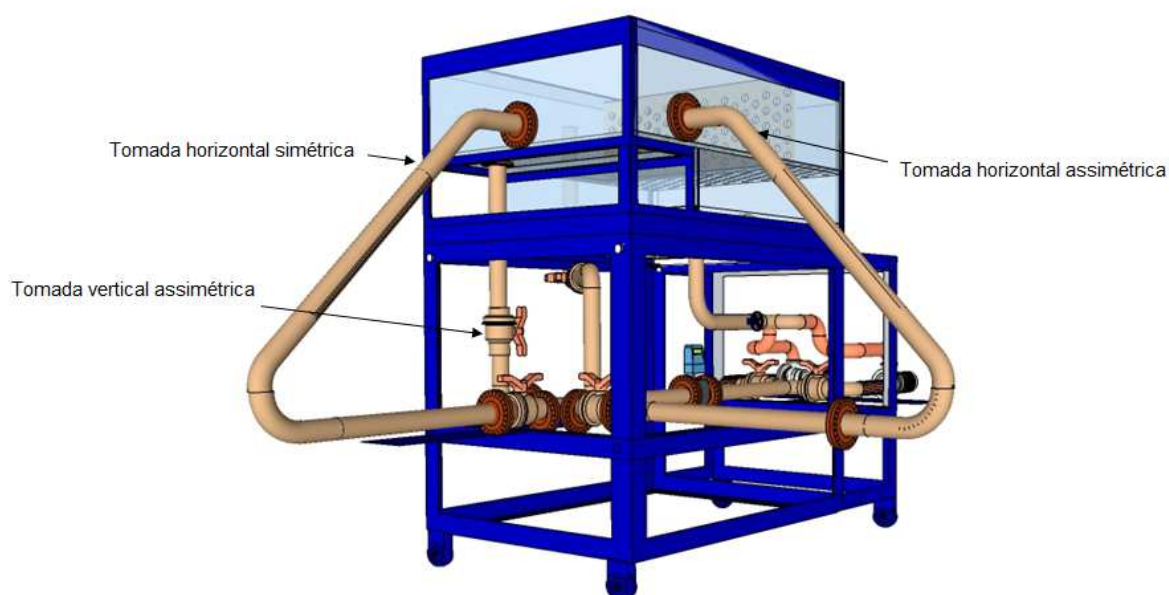


Figura 4.2 - Modelo experimental LOH2 do IPH.  
(Fonte: Melatte et al., 2013)

Em paralelo, há um modelo experimental em escala adaptado no LAHE de Furnas Hidrelétricas (Fig. 4.3 e 4.4). Este modelo conta com três tomadas horizontais. O objetivo deste modelo é testar diversas configurações de aproximação do escoamento e de níveis de submergência, ou seja, alternando-se o funcionamento das três tomadas será possível formar cinco diferentes combinações de aproximação do escoamento. Com isso será possível impor condições simétricas e assimétricas de aproximação do escoamento. O canal de adução possui seção retangular de 1,36 m de largura e 0,7 m de profundidade e 4,0 m de comprimento. Neste canal é possível variar a submergência da tomada em até 2,25 diâmetros. Esta variação é feita através de uma comporta basculante instalada na lateral do canal. A capacidade máxima de vazão para as três tomadas operando simultaneamente é de 0,18 m<sup>3</sup>/s, o que resulta em um valor de  $Fr$  no conduto de 1,8 e de  $We$  de aproximadamente 5651,5. O diâmetro do conduto da tomada é de 180 mm. Neste modelo são monitoradas as vazões aduzidas, os níveis d'água, as pressões nos condutos e tomadas e também são efetuadas medições de velocidades instantâneas ( $x, y, z$ ), por meio de um equipamento denominado de Acoustic Doppler Velocity (ADV) o qual possibilita a medição do campo de velocidades na entrada da tomada. O controle do nível a montante da tomada é feito por um sensor ultrassônico e as vazões são medidas por um medidor tipo Bazin colocado à jusante dos condutos.



Figura 4.3 - Modelo experimental adaptado no LAHE, FURNAS.  
(Fonte: Melatte et al., 2013)



Figura 4.4 - Modelo experimental adaptado no LAHE, FURNAS.  
(Fonte: Melatte et al., 2013)

Para os modelos experimentais do IPH, LOH1 e LOH2, as vazões volumétrica máximas e mínimas a serem utilizadas são de  $0,008 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,001 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Para cada caso de ensaio realizado, são realizadas medições de vazão, velocidade, pressão em pontos pré-determinados no reservatório e duto de saída de água. Nestes ensaios, somente as condições de vazão e altura de coluna de água ou submergência são alteradas, gerando dados que serão analisados em relação à formação e tipo de vórtice. Os



dados gerados em cada caso são relacionados com a literatura disponível verificando sua consistência.

As condições de vazão e de submergência utilizadas em cada caso do modelo experimental do IPH, devem ser aplicadas como condição de contorno no modelo numérico. Em relação aos resultados do modelo numérico, estes devem ser comparados com os resultados dos experimentos dos modelos do IPH. Esta é uma sistemática que pode ser utilizada para validar os resultados numéricos.

## 5 ABORDAGEM NUMÉRICA

O estudo de formação de vórtices em tomadas d'água realizado neste trabalho é feita por simulação numérica computacional (CFD - *Computational Fluid Dynamics*). Esta técnica é um ramo da Mecânica dos Fluidos que usa métodos numéricos e algoritmos para resolver e analisar problemas que envolvem escoamentos de fluidos.

### 5.1 ANSYS CFX

Atualmente existem diversos softwares comerciais de CFD disponíveis no mercado, cada um com características e potencialidades particulares. Entre os mais conhecidos, destacam-se o ANSYS CFX, o Fluent, o Star-CD, o Open Foam e o Flow-3D, dentre outros (HOLLWEG, 2012). Para o desenvolvimento deste trabalho foi escolhido o software comercial ANSYS-CFX como ferramenta de realização das simulações numéricas. O CFX é composto por quatro módulos que permitem desde a elaboração de geometria e malha computacional até o pós processamento. Para geração da geometria e malha do domínio de cálculo, utiliza-se o ICEM-CFD. Após concluída a etapa da geração de malha parte-se para o pré processamento no módulo CFX-PRE, onde são definidas as condições iniciais e de contorno, além dos parâmetros de controle de execução, tais como o critério de convergência, intervalo de tempo e coeficientes de relaxação, por exemplo. O CFX-Solver Manager é o módulo responsável por realizar a simulação numérica e o módulo de pós-processamento CFX-Post é o responsável pela visualização dos diferentes tipos de resultados. A estrutura do processo de simulação desde a elaboração da geometria até a obtenção dos resultados está representada no esquema da Fig. 5.1, onde podem ser identificados os diferentes módulos, brevemente apresentados.

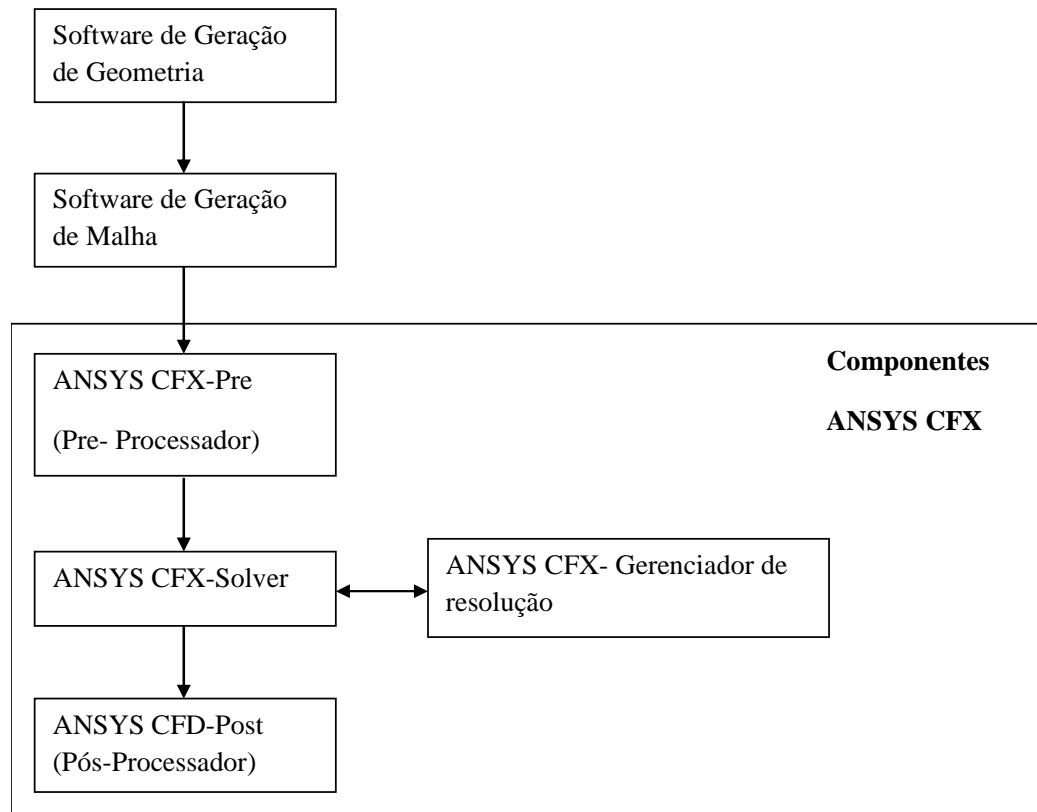


Figura 5.1 - Esquema de estrutura do ANSYS CFX.  
(Fonte: ANSYS 2009)

## 5.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O projeto de pesquisa inscrito na ANEEL com o número PD-0394-0912/2011, intitulado “Formação de Vórtices em Tomadas de água de Usinas Hidrelétricas”, prevê um estudo numérico de três modelos experimentais, dois do LOH/IPH-UFRGS e um do LAEH/FURNAS. No entanto, este trabalho é restrito ao modelo em escala de tomada vertical assimétrica (LOH2 do IPH). As simulações numéricas serão executadas utilizando diversos casos de vazão volumétrica e submergência.

### 5.2.1 Geometria

O domínio de análise desta dissertação consiste em uma geometria retangular, de comprimento  $L$ , largura  $W$  e altura  $H$ , conforme mostrado na Fig. 5.2(a,b). Na base do

domínio, no canto direito, está localizada a tomada d'água propriamente dita, com diâmetro  $D$ , a qual também pode ser visualizada na Fig. 5.2b.

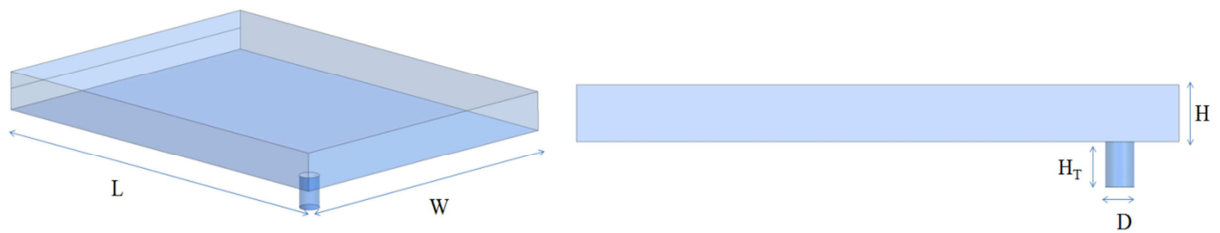


Figura 5.2 - Domínio de cálculo da tomada vertical assimétrica: (a) vista em perspectiva e (b) vista lateral.

As dimensões do domínio de cálculo da tomada de água vertical assimétrica são apresentadas na Tab. 5.1. Em todos os casos, a altura da camada de ar acima da camada de água é igual a 0,04 m.

Tabela 5.1 – Dimensões do domínio de cálculo .

| $S$ [-] | $D$ [m] | $H$ [m] | $L$ [m] | $H_T$ [m] | $W$ [m] |
|---------|---------|---------|---------|-----------|---------|
| 0,500   | 0,048   | 0,064   | 1,000   | 0,072     | 0,750   |
| 1,000   | 0,048   | 0,088   | 1,000   | 0,072     | 0,750   |
| 1,500   | 0,048   | 0,112   | 1,000   | 0,072     | 0,750   |

Para um melhor entendimento de algumas condições numéricas que serão abordadas neste capítulo, faz-se necessário, neste momento, identificar mais detalhadamente diferentes partes do domínio computacional. A divisão das componentes ou partes da geometria seguem a denominação identificadas nas Fig. 5.3(a-h).

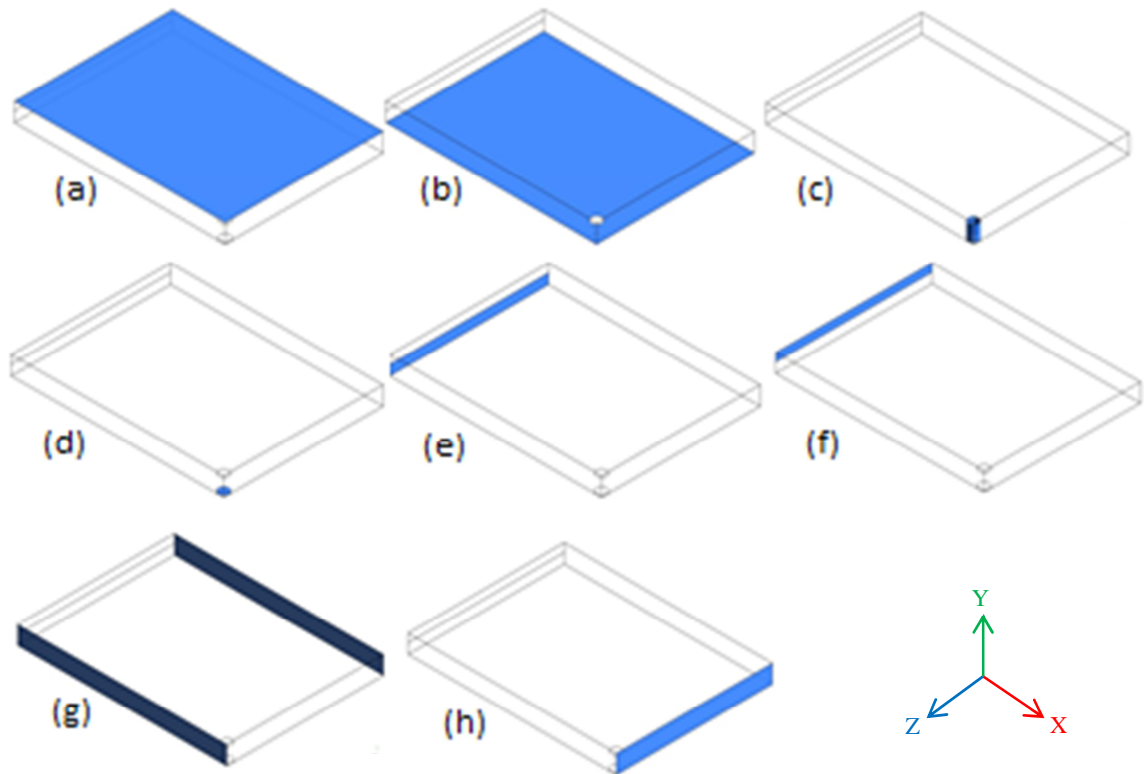


Figura 5.3 – Partes da geometria do modelo numérico tomada vertical assimétrica: (a) Parede superior, (b) Fundo, (c) Tubo, (d) Saída do tubo, (e) Entrada d'água, (f) Entrada de ar, (g) Paredes laterais, (h) Parede oposta.

### 5.2.2 Malha Computacional

A malha computacional é do tipo tetraédrica, com aproximadamente  $4,4 \times 10^6$  elementos, construída no software ANSYS ICEM-CFD. A Fig. 5.4 apresenta uma vista lateral do domínio computacional. Nesta figura pode-se identificar o refino na região de interface água-ar e próximo as paredes sólidas. O refinamento da malha na região de interface água-ar é importante, pois é nesta região que espera-se a ocorrência de vorticidade. Na região junto às paredes de fundo, laterais e duto, também foi aplicado refinamento de malha, pois nestas regiões há uma condição de não escorregamento, provocando grandes variações de velocidade.

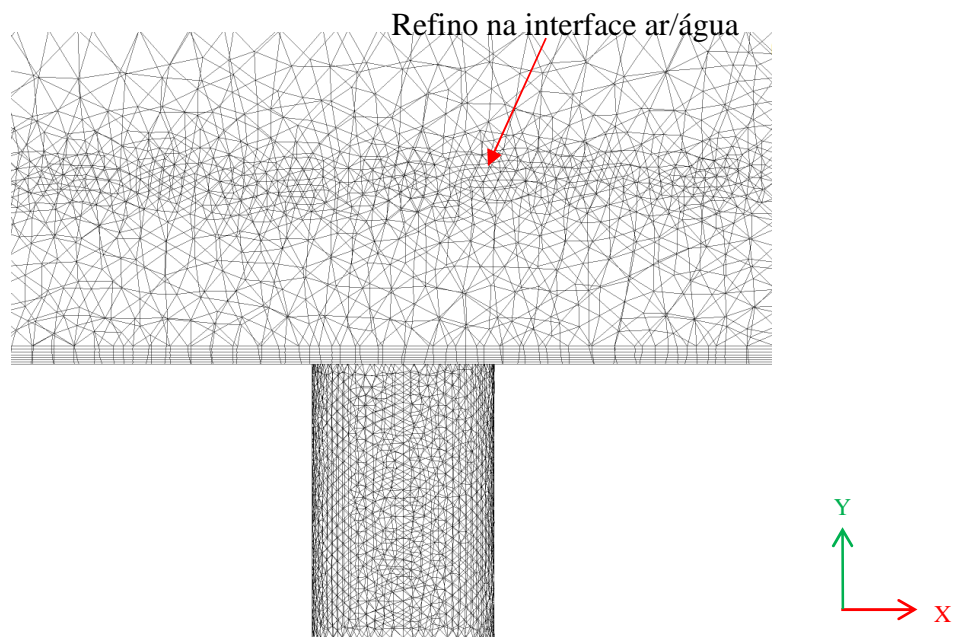


Figura 5.4 - Vista lateral da tomada vertical assimétrica.

Através das Figs. 5.5 e 5.6 pode-se observar que foi aplicado refino na região próxima as paredes do tubo de saída. A região da malha próximo ao duto da tomada d'água representa o ponto da geometria onde deve haver a formação de vorticidade. Neste ponto, os resultados das variáveis velocidade, pressão e vorticidade são de grande importância para entendimento do problema, por isto o refinamento da malha nesta região é o mais importante para resolução correta do problema.

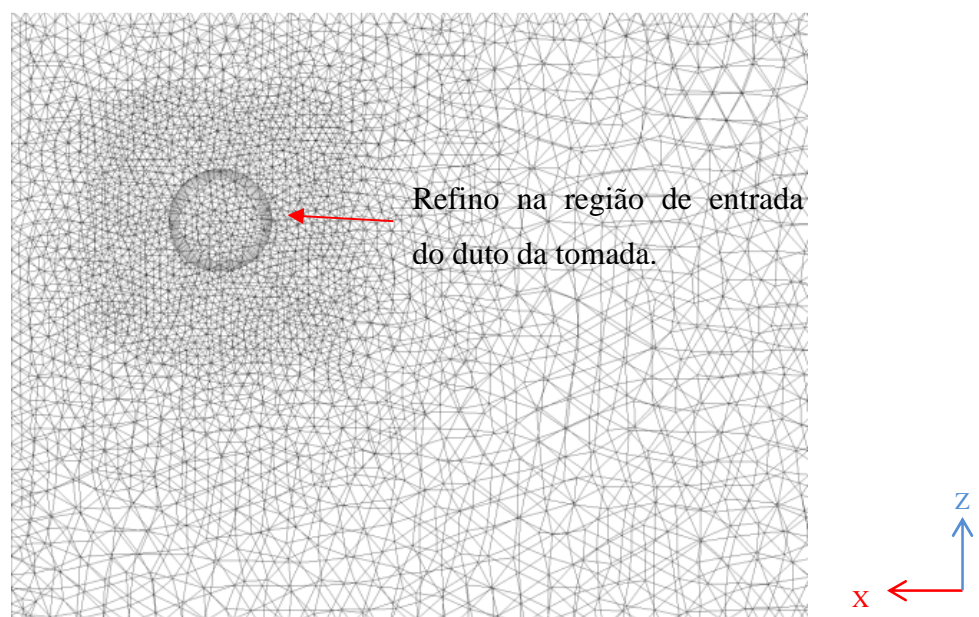


Figura 5.5 - Vista superior da tomada vertical assimétrica.



Figura 5.6 - Vista em perspectiva tomada vertical assimétrica.

### 5.3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático utilizado é bifásico, composto pelas equações da conservação da massa e quantidade de movimento para cada uma das fases e pela equação da fração volumétrica para uma das fases, as quais são apresentadas na sequência.

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla(r_\alpha \rho_\alpha U) = 0, \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial(r_\beta \rho_\beta)}{\partial t} + \nabla(r_\beta \rho_\beta U) = 0, \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial(\rho_m U)}{\partial t} + \nabla(\rho_m U U - \mu_{eff} (\nabla U + (\nabla U + (\nabla U)^T))) = S_M - \nabla p, \quad (5.3)$$

$$\frac{\partial(r_\alpha)}{\partial t} + \nabla(r_\alpha U) = 0, \quad (5.4)$$

$$r_\alpha + r_\beta = 1, \quad (5.5)$$

onde  $r$  é a fração volumétrica da fase ( $\alpha$  para a água e  $\beta$  para o ar),  $U$  é o vetor velocidade,  $p'$  é a pressão modificada, definida em função da pressão estática e da energia cinética turbulenta:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k, \quad (5.6)$$

$\rho_m$  é a massa específica da mistura e  $\mu_{eff}$  a viscosidade efetiva, definidas como:

$$\rho_m = r_\alpha \rho_\alpha + r_\beta \rho_\beta, \quad (5.7)$$

$$\mu_{eff} = \mu_m + \mu_t, \quad (5.8)$$

sendo  $\mu_t$  a viscosidade turbulenta e  $\mu_m$  a viscosidade da mistura, definida como:

$$\mu_m = r_\alpha \mu_\alpha + r_\beta \mu_\beta. \quad (5.9)$$

$S_M$  é o termo fonte devido à gravidade, definido como:

$$S_M = (\rho - \rho_{ref})g, \quad (5.10)$$

onde  $g$  é o vetor aceleração gravitacional e  $\rho_{ref}$  é a massa específica de referência, definida como a massa específica do fluido mais leve (ar). Desta forma, este termo fonte atua apenas na fase líquida, não havendo variação de pressão hidrostática na fase gasosa.

Por ser simples e robusto, o modelo de turbulência utilizado foi o  $\kappa - \varepsilon$  composto por duas equações: uma para a energia cinética turbulenta e outra para a dissipação da energia cinética turbulenta dadas, respectivamente, por:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho U k) = \nabla \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \quad (5.11)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho U \varepsilon) = \nabla \left[ \left( \mu_m + \frac{\mu_t}{\mu_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} P_k - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon), \quad (5.12)$$

onde  $P_k$  é o termo de produção da energia cinética turbulenta, obtido pela seguinte equação:



$$P_k = \mu_t \nabla U (\nabla U + (\nabla U)^T). \quad (5.13)$$

Com os campos de energia cinética turbulenta e dissipação determinados, a viscosidade turbulenta é então calculada pela seguinte equação:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (5.14)$$

Os valores das constantes obtidos no manual do software CFX,  $C_\mu$ ,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$  e  $\sigma_\varepsilon$  são:

$$C_\mu = 0,09; C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; \sigma_k = 1,0; \sigma_\varepsilon = 1,3$$

### 5.3.1 Condições de Contorno, Iniciais e Operacionais

Como condição de contorno na entrada e saída do tanque, foi prescrita a vazão volumétrica da água de cada caso. Na parede superior do tanque foi utilizada a condição de contorno do tipo livre escorregamento (“Free Slip Wall”). Em todas as outras paredes do domínio computacional utiliza-se a condição de contorno de não deslizamento.

Em função dos vórtices terem característica transiente, os resultados apresentados nesta dissertação foram obtidos com simulações neste tipo de regime, com  $\Delta t = 0,01$  s e com tempo total de simulação de 60 s.

Como condição inicial, foram utilizados resultados de campo de velocidade, vorticidade e pressão de simulações em regime permanente. Neste regime, para todos os casos  $S$  e  $Q$ , foi utilizado o critério de mínimo e máximo de convergência de 500 e 2000 iterações, respectivamente. A etapa de regime permanente foi utilizada por não serem conhecidas as condições reais de campo de velocidade no domínio. Assim, com os resultados obtidos no regime permanente é possível iniciar a simulação em regime transiente com campos de velocidade já determinados.

Como critério de convergência, utilizou-se os resíduos numéricos das equações que governam o problema, com valor de  $10^{-8}$ . Para o regime permanente o CFX oferece um

recurso de passo de tempo no relaxamento das equações. Neste caso foi utilizado um valor de 0,01 s.

O estudo de caso foi realizado com as condições de  $S$  e  $Q$  mostradas na Tab. 5.2. Para cada caso simulado, a geometria e malha tiveram adequações correspondentes à altura de água, esta sempre em relação a  $D$ . Já a altura da camada de ar permaneceu constante com valor de 0,04 m.

Tabela 5.2 - Condições operacionais de ensaio no modelo experimental.

| $Q$ (m <sup>3</sup> /s) | $S$ [ - ] |
|-------------------------|-----------|
| 0,00053                 | 0,5       |
| 0,00053                 | 1,0       |
| 0,00079                 | 1,0       |
| 0,00105                 | 1,0       |
| 0,00150                 | 1,0       |
| 0,00053                 | 1,5       |
| 0,00079                 | 1,5       |
| 0,00105                 | 1,5       |
| 0,00150                 | 1,5       |

#### 5.4 INDEPENDÊNCIA DE MALHA TEMPORAL E ESPACIAL

A utilização de valores inadequados de intervalo de tempo, número de iterações, número e tamanho dos elementos de malha podem provocar perda nas informações e a não convergência dos resíduos das equações. O estudo de sensibilidade do modelo numérico, com diferentes malhas espaciais e temporais, bem como o número de iterações, permite verificar possíveis variações dos resultados e, então, otimizar o processo de simulação. Em função das condições citadas, foi realizada uma investigação sobre a influência do refinamento das malhas temporais e espaciais, cujos resultados são apresentados no Capítulo 6.

## 5.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA MALHA

O processo de verificação do modelo numérico é composto pela análise das malhas espaciais e temporais. Este procedimento de verificação visa garantir que a variação nos resultados seja mínima em relação à diferença de malha mais grosseira com a mais refinada. Do ponto de vista do custo computacional, este procedimento é muito relevante, pois identifica qual é a malha a ser utilizada, otimizando os recursos computacionais sem perda da qualidade dos resultados encontrados.

As etapas da pesquisa de sensibilidade de malha demandam alto custo computacional para obtenção dos resultados de cada fase de análise tanto espacial quanto temporal. Os *desktops* dos laboratórios de simulação numérica da UNISINOS utilizados na pesquisa possuem processadores Intel Core i7 com memória RAM (memória de acesso aleatório, (*Random Access Memory*) de 16 GB (gigabyte). Nestas condições, o tempo médio de simulações em regime transiente é de dezoito dias, gerando resultados que ocupam espaço de 100 GB por simulação. Para simulação em regime transiente, com malha computacional de  $4,4 \times 10^6$  elementos e intervalo de tempo de 0,005 s, foram necessários vinte e sete dias de simulação para obtenção de 60 s de simulação.

## 6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados resultados das simulações numéricas utilizadas na análise do problema de formação de vórtices em tomadas de água em hidrelétricas com utilização do domínio de cálculo do modelo numérico LOH2 vertical assimétrico, descrito no capítulo 5.

Os resultados apresentados estão divididos em duas partes, a primeira refere-se ao estudo de avaliação das malhas espaciais e temporais. Na segunda parte são apresentados resultados de estudo de Caso conforme são mostrados na Tab. 6.1.

Tabela 6.1- Casos de simulação numérica modelo numérico LOH2.

|                           |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $S$ [ - ]                 | 0,5     | 1.0     | 1,0     | 1,0     | 1,0     | 1,5     |
| $Q$ [ m <sup>3</sup> /s ] | 0,00053 | 0,00053 | 0,00079 | 0,00105 | 0,00150 | 0,00150 |

Como comentado no Item 5.3.1, inicialmente, cada condição operacional de  $S$  e  $Q$  foi simulada em regime permanente. Embora o processo real seja transiente, estas simulações em regime permanente tem como objetivo fornecer as condições iniciais de campo de velocidade para as simulações em regime transiente. Assim, este capítulo está subdividido em resultados de regime permanente e resultados de regime transiente.

Para os regimes permanente e transiente são apresentados resultados de isosuperfície de fração volumétrica de água, linhas de corrente, campos de vorticidade em relação ao eixo cartesiano  $y$ , vetores de velocidade da  $Q$ , no plano na saída do tubo da tomada assimétrica vertical. A isosuperfície de fração volumétrica da água refere-se à variação de altura da interface ar-água.

### 6.1 INVESTIGAÇÃO DAS MALHAS ESPACIAIS E TEMPORAIS

Conforme comentado anteriormente, é apreseto neste item resultados da investigação da independência das malhas espaciais e temporais, iniciando-se pelas primeiras citadas.

### 6.1.1 Malha Espacial

A altura da interface água-ar varia com o espaço e com o tempo. Assim, o processo de definição de escolha do tipo de malha que possa capturar a formação de vórtice é complexo e exige muitos testes até a escolha da malha definitiva. Após a realização de uma série destes testes de malha, verificou-se qual malha espacial capturou estas variações no comportamento do vórtice. A partir desta, foram construídas outras três malhas, conforme sugerido por CELIK (2008), com variação de 30% em relação ao número total de elementos. Conforme descrito no Item 5.2.2, com a variação do número de elementos da malha não são alteradas as regiões definidas para ter um melhor refinamento. O que muda com este processo de variação do número de elementos num mesmo domínio computacional é o tamanho de cada elemento. Esta variação é que deve ser entendida e analisada.

Dos casos simulados, as condições operacionais mais críticas são aquelas que apresentam  $S=1 D$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ . Nesta condição de  $Q$ , o  $Fr$  apresenta valor de 1,21 que, relacionado com  $S = 1 D$ , indicaria a formação de um vórtice tipo 6, conforme apresentado na Fig. 3.3. Como também comentado naquele item, os vórtices do tipo 6 são os mais críticos em função da intensidade da vorticidade. Isso faz com que, em termos de simulação numérica, a grade computacional tenha de ser muito mais elaborada em relação aos demais casos. Por esse motivo, foram escolhidas estas condições operacionais (as mais críticas) para fazer a validação espacial do modelo numérico. A validação foi, então, realizada comparando-se resultados obtidos com 5 diferentes malhas computacionais em relação ao número de elementos, as quais são:  $1,1 \times 10^6$ ;  $3,1 \times 10^6$ ;  $4,4 \times 10^6$ ;  $5,4 \times 10^6$  e  $6,5 \times 10^6$ .

As simulações foram executadas em regime permanente com 2000 iterações e no regime transiente um total de 60 s.

A velocidade  $v$  no interior do duto da tomada é a variável utilizada para comparação dos resultados das simulações com suas respectivas malhas. Para a coleta dos dados desta variável, foram criadas linhas no interior do duto em cota de 0,036 m do fundo do reservatório, conforme pode ser visto na Fig. 6.1. Estas linhas são perpendiculares entre si e paralelas aos eixos  $x$  e  $z$ . Em cada linha foram coletados 100 pontos de amostra da variável  $v$ .

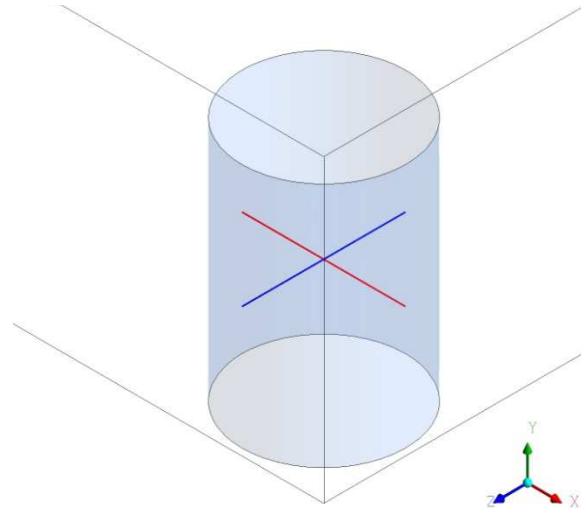


Figura 6.1 - Linhas de captura de variável velocidade  $v$

As curvas apresentadas na Fig. 6.2 são referentes aos pontos de velocidade  $v$  em linha paralela ao eixo  $x$ . Na Fig. 6.3 são apresentadas curvas de velocidade  $v$  em linha paralela ao eixo  $y$ .

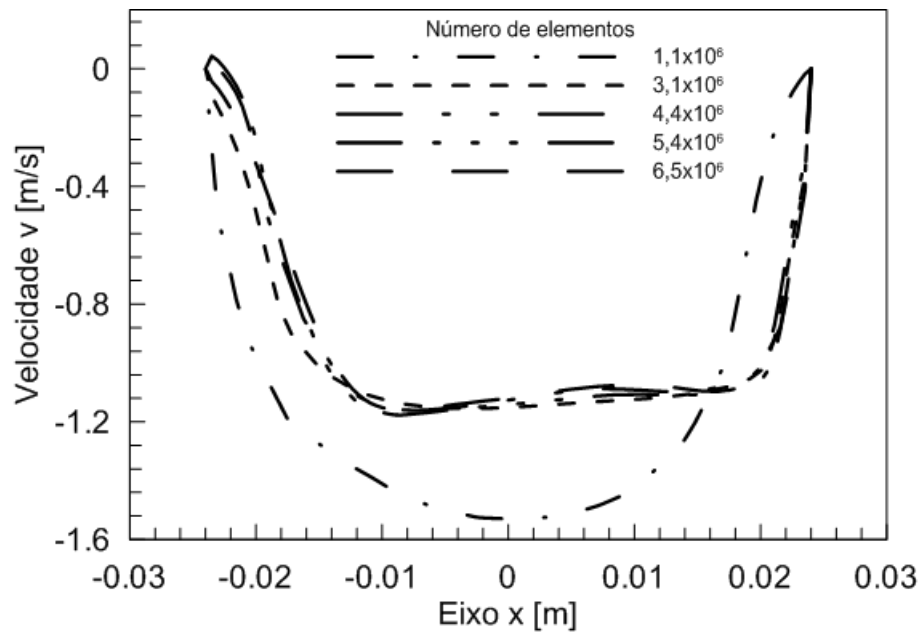


Figura 6.2 - Velocidade  $v$  eixo  $x$  modelo numérico LOH2, para diferentes malhas espaciais.

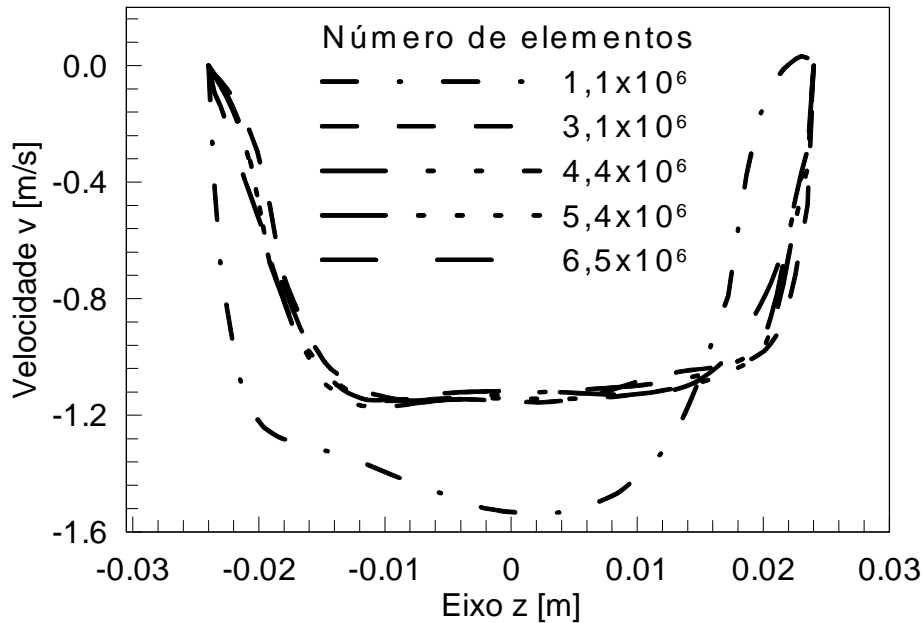


Figura 6.3 - Velocidade  $v$  eixo  $z$  modelo numérico LOH2, para diferentes malhas computacionais

A partir das curvas obtidas com a variável  $v$ , é possível a verificação de convergência dos resultados para malhas com número de elementos superiores a  $3,1 \times 10^6$ . Exceto a malha mais grosseira com  $1,1 \times 10^6$  elementos que apresenta pontos muito afastados dos demais, onde as malhas são mais refinadas.

### 6.1.2 Malha Temporal

A validação da malha temporal pode ser analisada em regime permanente e regime transiente. No regime permanente, utiliza-se um fator de sub-relaxação na fração volumétrica ( $r$ ) com valor de 0,1. No regime transiente, o intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) utilizado é de 0,01 s, com redução deste valor para 0,005 s em condições que deseja-se melhorar a estabilidade na diferença de  $Q$  entre a entrada e saída do domínio computacional.

A proposta de verificação deste parâmetro de validação é alterar  $\Delta t$  em 50% do valor inicial, tanto com aumento quanto redução. Também é importante a verificação dos resultados com a variação do número de iterações no regime permanente, pois estes são utilizados como condição inicial para o regime transiente.

O número de iterações em regime permanente deve ser alterado com mesmo critério utilizado para  $\Delta t$ , ou seja, um valor inicial de número de iterações passando para um valor

mais elevado e um mais reduzido com o propósito de verificar a alteração dos resultados com a variação do número de iterações.

Em regime transiente utilizou-se diferentes valores de  $\Delta t$ . Os valores utilizados foram: 0,01 s; 0,03 s; 0,05 e 0,005 s. A partir das simulações executadas para cada caso de  $\Delta t$ , foram obtidas amostras da variável velocidade  $v$  em linhas no interior do duto a 0,036 m do fundo reservatório, conforme mostra a Fig. 6.1.

As curvas representadas na Fig. 6.4 representam a velocidade  $v$  na linha paralela ao eixo  $x$ . A Fig. 6.5 apresenta as curvas relativas à velocidade  $v$  na linha paralela ao eixo  $z$ . A partir destas curvas é possível identificar que há convergência dos resultados para esta variável sem variações significativas dos valores com a redução do  $\Delta t$ .

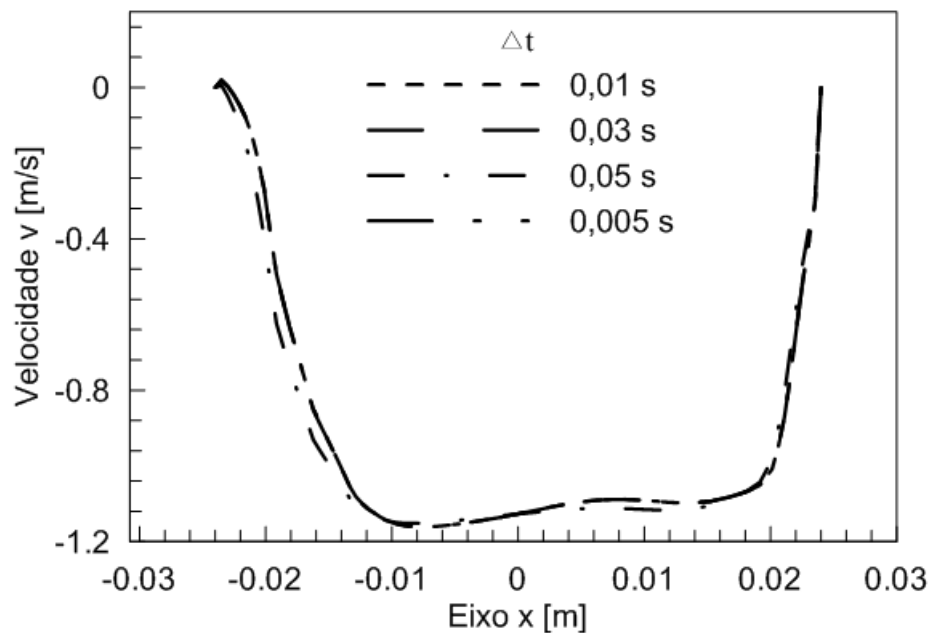


Figura 6.4 - Velocidade  $v$  eixo  $x$ , para diferentes  $\Delta t$ .



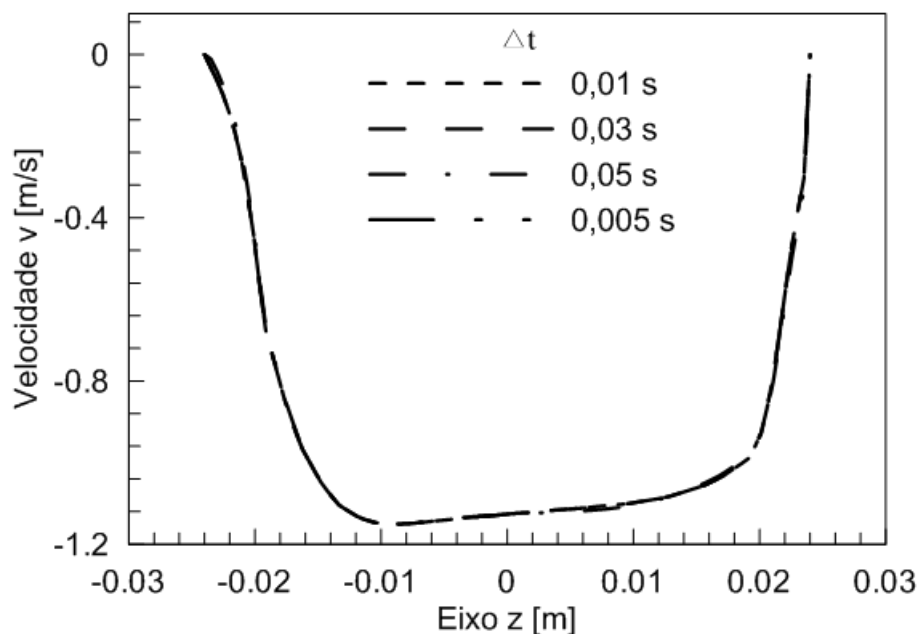


Figura 6.5 - Velocidade  $v$  eixo  $z$ , para diferentes  $\Delta t$ .

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que a malha mais adequada para representar o processo físico deste estudo é a malha com  $4,4 \times 10^6$  elementos e  $\Delta t$  de 0,01 s.

## 6.2 ESTUDO DE CASO

Neste Item são apresentados resultados em regime permanente e regime transiente para as diferentes condições operacionais mostradas na Tab.6.1.

### 6.2.1 Regime Permanente

Para o regime permanente, com um número total de 2000 iterações, foram obtidos resultados que são utilizados como condição inicial para todos os Casos mostrados na Tab. 6.1 No entanto, apenas resultados do Caso mais crítico ( $S = 1 D$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ ) são apresentados neste Item, o qual corresponde aquele que fornece vórtice do tipo 6. Os resultados apresentados são linhas de corrente (sobrepostas à isosuperfície) e isosuperfície de

fração volumétrica de água ( $r$ ), a qual representa uma região onde há uma mistura das fases ar e água.

Além da avaliação das malhas espaciais e temporais, também foi realizado um estudo relativo ao modelo de turbulência. Diversos deles foram testados, como por exemplo  $\kappa - \Omega$ , LES Dynamic Model e  $\kappa - \varepsilon$ . Os dois primeiros apresentavam resultados onde as linhas de corrente de velocidade d'água obtidas no regime permanente não indicavam uma distribuição de aproximação uniforme para a tomada d'água. Com a utilização destes resultados para a condição inicial do regime transiente já nas primeiras iterações as simulações divergiram. Isto pode ter ocorrido muito provavelmente, pelas instabilidades inerentes destes modelos de turbulência. Além disso, é sabido que o modelo de turbulência  $\kappa - \varepsilon$  é um dos mais estáveis.

Nas Figs. 6.6(a-b) são apresentados resultados de isosuperfície com fração volumétrica da água igual a 0,5. Na Fig. 6.6(a), a isosuperfície de  $r$  em vista lateral indica uma pequena depressão na altura na região da tomada de água. Na Fig. 6.6(b), em vista superior e sobreposta a isosuperfície, é possível observar a aproximação uniforme das linhas de corrente à tomada de água.

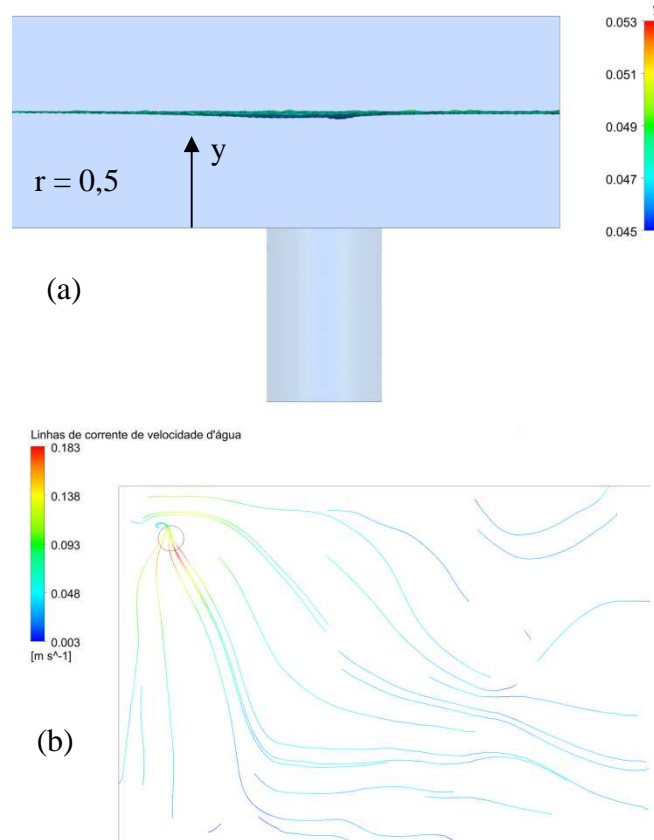


Figura 6.6 - Isosuperfície de  $r$  e linhas de corrente, para  $S = 1$  e  $Q = 0,0015\ m^3/s$  : (a) vista lateral e (b) vista superior.

### 6.3 REGIME TRANSIENTE

Para o regime transiente são apresentados resultados que podem representar a formação de vórtice na tomada d'água, os quais são: isosuperfície com diferentes valores de  $r$ , linhas de corrente de velocidade d'água, campo de vorticidade e vetores de velocidade.

Com o objetivo de identificar o valor de  $r$  que melhor representa as condições experimentais, são mostrados nas Figs. 6.7(a-h) isosuperfícies com diferentes valores de  $r$ , comparando-se com as respectivas condições operacionais, as quais são:  $S = 1$  e  $Q = 0,0015\ m^3/s$ . O tempo total de simulação numérica neste regime é de 60 s e o modelo de turbulência utilizado é *SST (Shear-Stress Transport)*.

Em vista lateral, o resultado experimental para o modelo LOH2 vertical assimétrico é apresentado na Fig. 6.7(a), onde pode ser visualizado o tipo de vórtice formado para as condições operacionais de  $S = 1$  e  $Q = 0,0015\ m^3/s$ . Nesta figura é possível observar a

formação de vórtice completamente desenvolvido, com núcleo de ar até a entrada do tubo da tomada d'água.

As Figs. 6.7(b-h) apresentam resultados de isosuperfície de fração volumétrica de água com valor de  $r$  crescente de 0,50 a 0,98, em vista lateral. Com este critério comparativo entre resultado do modelo experimental com modelo numérico é possível definir o melhor valor de  $r$  à ser utilizado para verificação dos resultados.

Como pode ser observado na Fig. 6.7(h),  $r = 0,98$  pode representar o problema de formação de vórtice na tomada d'água vertical assimétrica, quando comparada ao resultado do ensaio experimental (Fig. 6.7(a)). O resultado reproduz um vórtice completamente desenvolvido com núcleo de ar que pode ser classificado como tipo 6, conforme visto na Fig. 3.1.

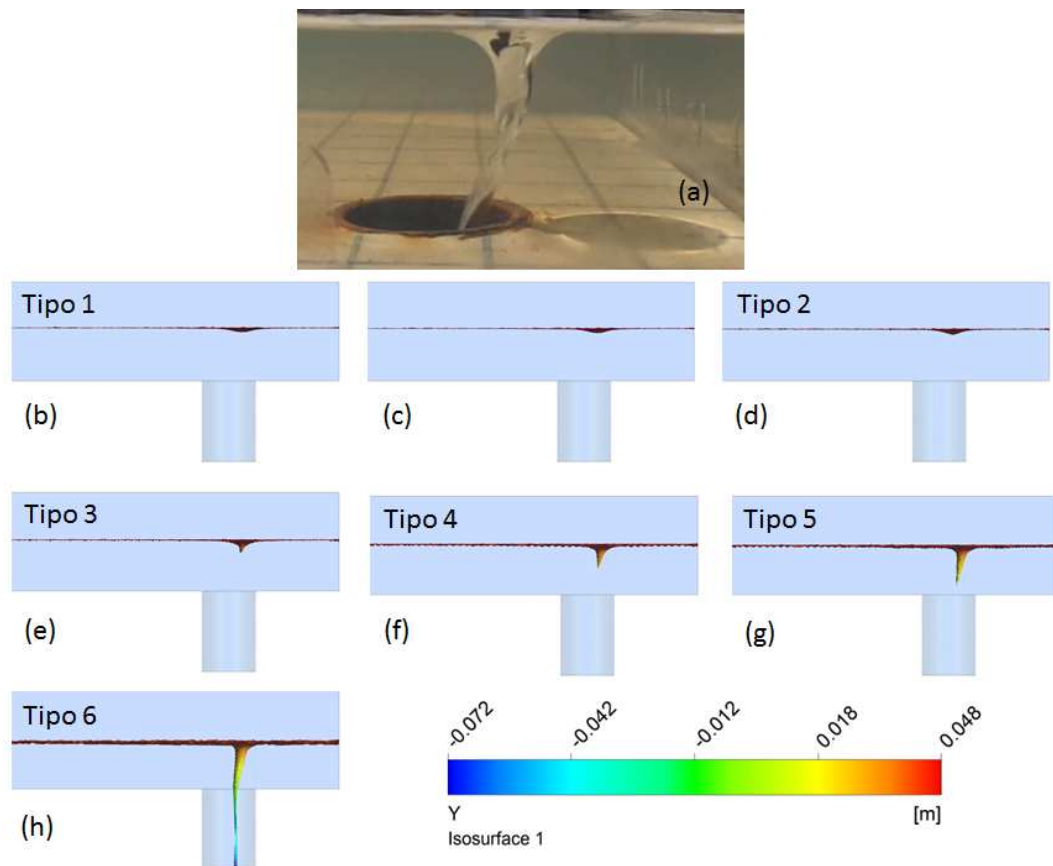


Figura 6.7 - Vista lateral de vórtice formado no modelo experimental (a), Isosuperfície de  $r$ : (b) 0,50; (c) 0,60; (d) 0,70; (e) 0,80; (f) 0,90; (g) 0,95; (h) 0,98.

Conforme visto anteriormente, o valor de  $r$  que melhor representa a formação de vórtice na tomada d'água é igual a 0,98. Assim, os resultados de isosuperfície, dos casos apresentados na Tab. 6.1, apresentados deste ponto em diante foram obtidos com  $r = 0,98$ .

As Figs. 6.8(a-b) mostram em vista lateral resultados para  $S = 0,5$  e  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . A Fig. 6.8(a) mostra vórtice formado no modelo experimental, enquanto na Fig. 6.8(b) é possível observar o resultado numérico do vórtice completamente desenvolvido. Nestas figuras é possível verificar-se que o vórtice formado é do tipo 6, de acordo com a classificação de PADMANABHAN e HECKER da Fig. 3.1.

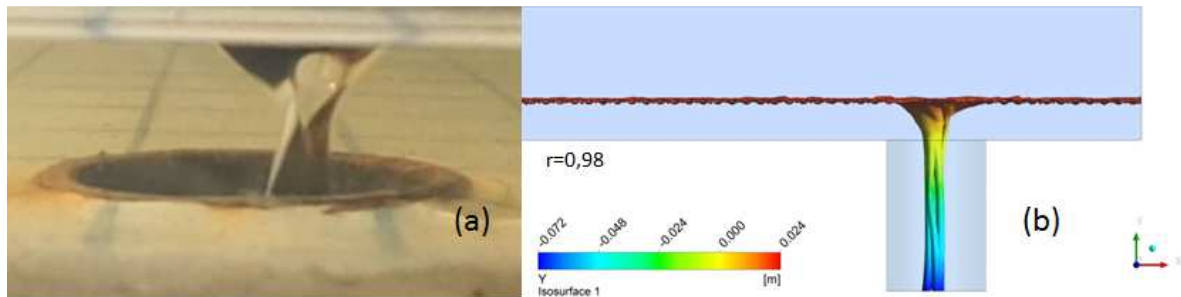


Figura 6.8 - Vórtice para  $S = 0,5$  e  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ , com  $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico.

Em vista lateral, as Figs. 6.9(a-b) mostram, respectivamente, resultados experimental e numérico para  $S = 1,0$  e  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . Em ambas as figuras pode-se observar que o vórtice formado é do tipo 5.

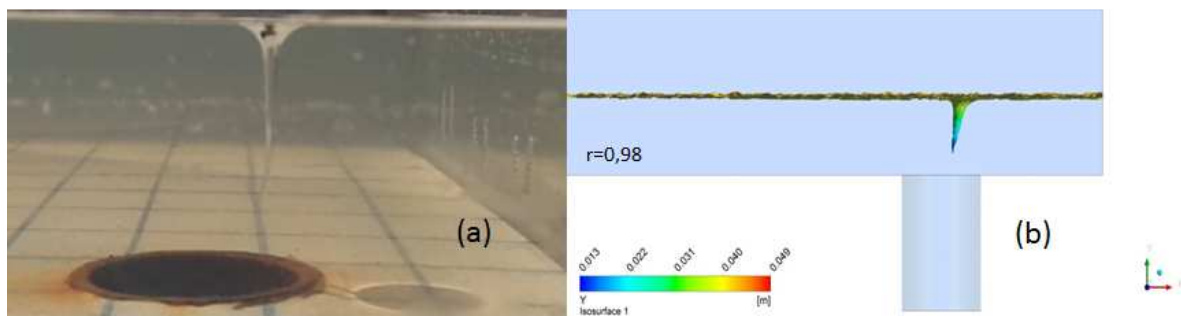


Figura 6.9 - Vórtice para  $S = 1$  e  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ , com  $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico.

As Figs. 6.10(a-b) mostram, respectivamente, resultados experimental e numérico para  $S = 1,0$  e  $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$ . Na Fig. 6.10(a) o vórtice obtido no modelo experimental é do tipo 6. Na Fig. 6.10(b) é apresentado resultado obtido no modelo numérico com vórtice tipo 5.

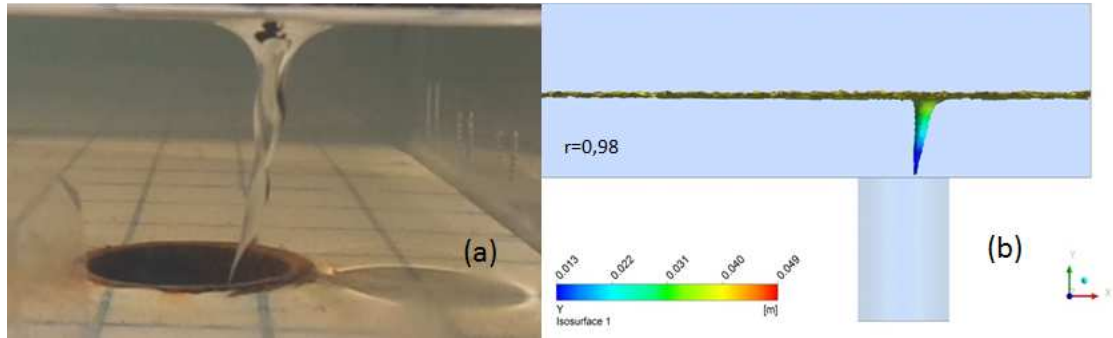


Figura 6.10 - Vórtice para  $S = 1$  e  $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$ , com  $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico.

As Figs. 6.11(a-b) mostram, respectivamente, resultados experimental e numérico para  $S = 1,0$  e  $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ . Em ambas as figuras pode-se verificar que o vórtice formado é do tipo 6.

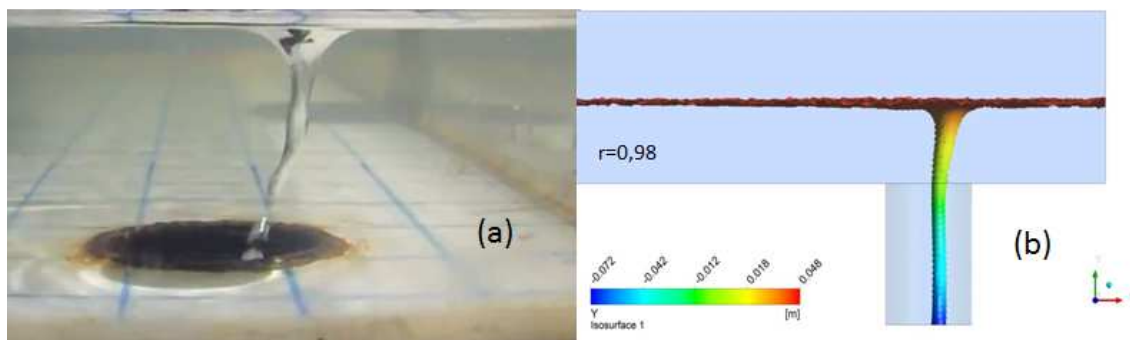


Figura 6.11 - Vórtice para  $S = 1$  e  $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , com  $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérico.

As Figs. 6.12(a-b) mostram, respectivamente, resultados de ensaio experimental e numérico do modelo LOH2 com  $S = 1,5$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ . Com o resultado experimental, em vista lateral, mostrado na Fig. 6.12(a) é possível verificar a formação de vórtice completamente desenvolvido com núcleo ar. O resultado de simulação numérica (Fig. 6.12(b), também em vista lateral) é visualizada a isosuperfície de  $r$ , a qual também mostra vórtice completamente desenvolvido com núcleo de ar, porém com diâmetro do cone de ar aparentemente maior que no modelo experimental.

Conforme visto no Capítulo 3 a formação de vórtice é dependente de  $S$ , velocidade de aproximação e geometria de aproximação à tomada. Neste caso de  $S = 1,5$ , a maior coluna de água no reservatório da tomada d'água pode ter influência de estabilizar o sistema, minimizando a formação de vórtices. O tipo de resultado obtido para este caso no modelo numérico em relação a isosuperfície de  $r$ , pode ser atribuído ao número de elementos de malha computacional utilizado, isso porque a região de refino próximo ao duto da tomada

d'água é muito importante para resolução do problema. Portanto, para este caso de  $S$ , sugere-se um trabalho de continuidade da pesquisa onde possa haver um aprimoramento no refino nesta região.

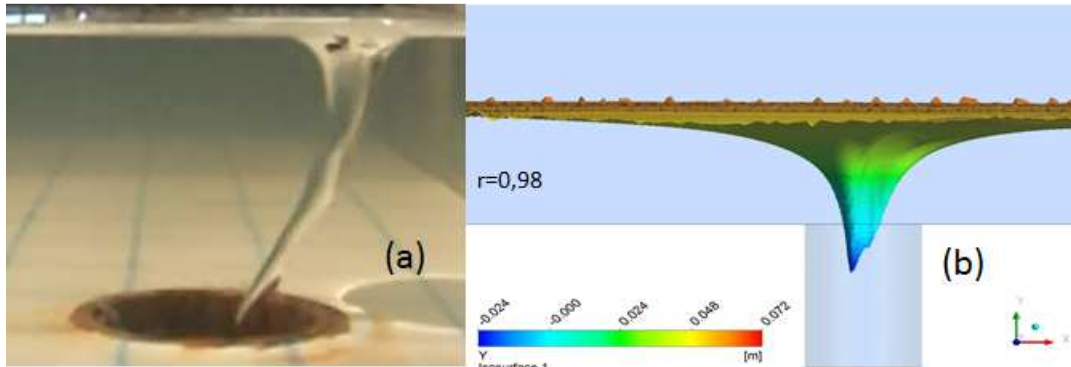


Figura 6.12 - Vórtice  $S = 1,5$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $r = 0,98$ : (a) experimental e (b) numérica.

Com o critério de comparação dos tipos de vórtice obtidos nos modelos numérico e experimental, e visualização da isosuperfície de  $r$  é possível verificar na Fig. 6.13 a tendência de concordância de resultados numéricos e experimentais com a utilização de  $r = 0,98$  em relação a  $r = 0,5$ . A reta tracejada representa a linha teórica de concordância dos resultados obtidos numericamente e experimentalmente. Pode-se notar que os pontos sobre a reta indicam a semelhança nos resultados numéricos e experimentais quando  $r = 0,98$ . Os pontos situados abaixo da reta de referência, com  $r = 0,50$ , indicam tipos de vórtices menos severos nos resultados no modelo numérico, quando comparados aos resultados obtidos no modelo experimental.

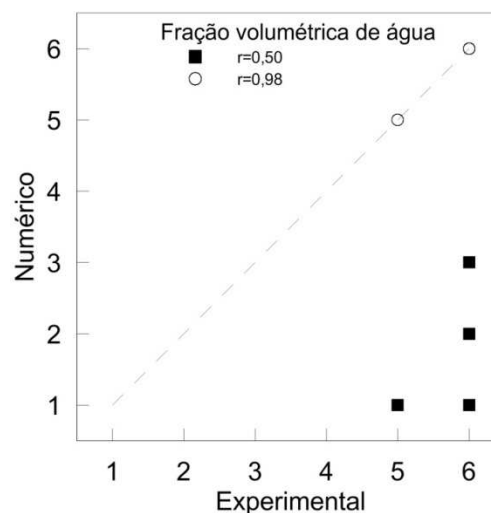


Figura 6.13 - Comparação de tipos de vórtice nos modelos numérico e experimental para  $r = 0,5$  e  $r = 0,98$ .

As Figs. 6.14(a-d) mostram linhas de corrente sobrepostas à linha de isosuperfície de fração volumétrica de água, ou seja, estão localizadas na superfície da água. O plano de visualização das Figs. 6.14(a-d) é de topo. Todos os resultados são apresentados na mesma escala e estão em ordem decrescente de  $Q$ , ou seja, 0,0015; 0,00105; 0,00079 e 0,00053  $\text{m}^3/\text{s}$ , respectivamente, para  $S = 1$ .

O giro próximo à região da tomada d'água, visualizado através das linhas de corrente de velocidade que estão posicionadas em plano a 0,048 m acima da parede de fundo do reservatório. (apresentadas nas Figs. 6.14(a-d)) podem indicar a tendência de vorticidade naquela região. Observando-se a escala de velocidades e comparando-se as Figs. 6.14(a-d) entre si, pode-se observar que a intensidade de giro mostrado na Fig. 6.14(a) é bem maior que aquela apresentada na Fig. 6.14(d), as quais apresentam, respectivamente, velocidades iguais a 0,25 e 0,07  $\text{m/s}$ , correspondendo  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente. Estes resultados e observações concordam com ASCE (1995), cujo comentário pode ser visto na introdução do Capítulo 3.

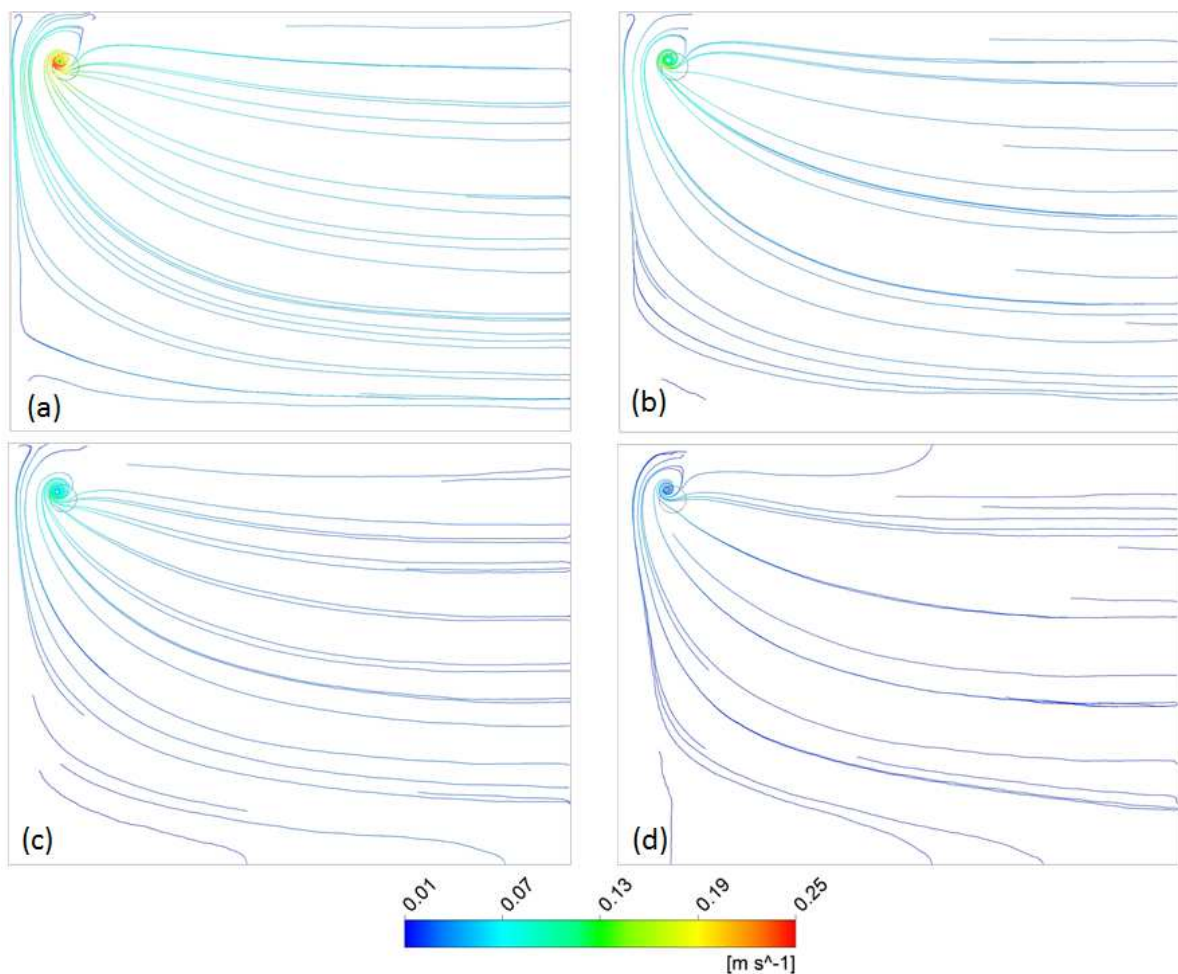


Figura 6.14 - Linhas de corrente de velocidade de água para  $S = 1$ : (a)  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b)  $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c)  $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$  e (d)  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ .



As Figs. 6.15(a-b) mostram a vorticidade  $y$  da água em Caso de  $S=1$  e  $Q=0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , em plano nos eixos  $zx$  a  $0,048 \text{ m}$  no sentido positivo de  $y$ . Na Fig. 15(a) é possível visualizar a vorticidade  $y$  em toda extensão da tomada de água. O detalhe “A”, indicado nas figuras, evidencia a intensidade maior da vorticidade  $y$  na região do duto da tomada com valores negativos, que significam uma rotação em sentido anti-horário em relação ao eixo  $y$ . No detalhe “A” da Fig. 15(b) é possível identificar regiões próximas às paredes do domínio onde há vorticidade, porém sem apresentar rotação e vorticidade, também visualizado pelas linhas de corrente conforme apresentado nas Figs. 14(a-d).

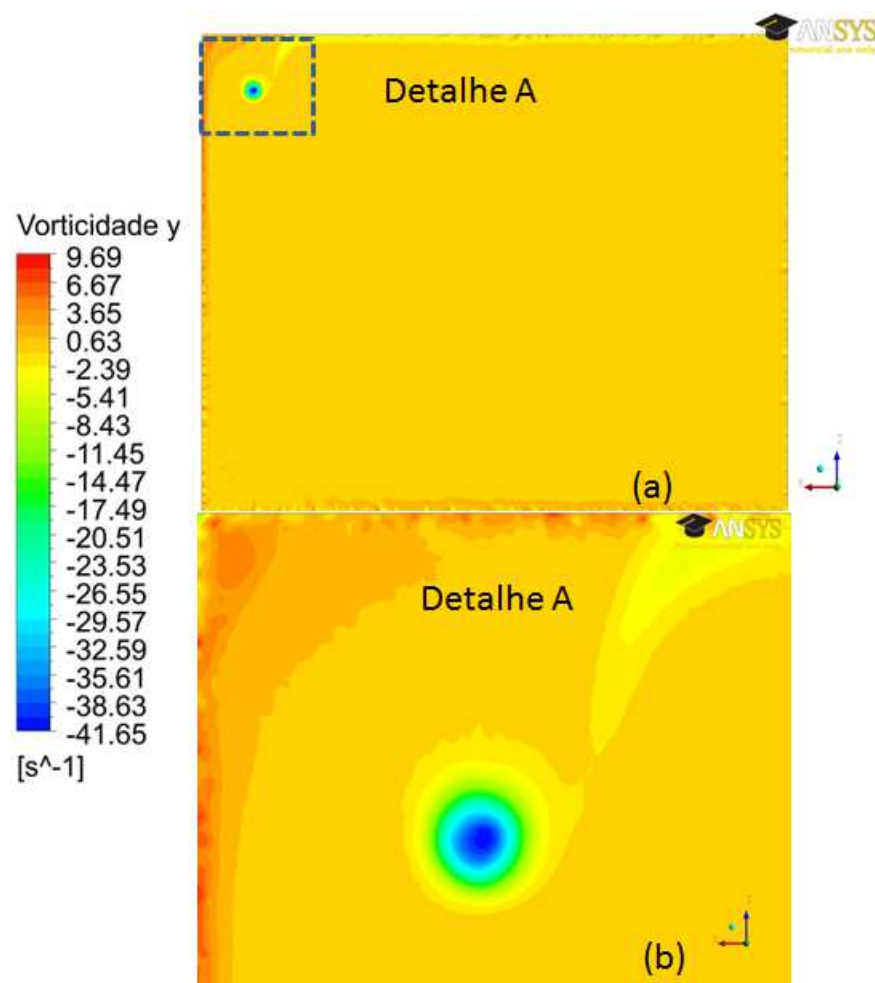


Figura 6.15 – Vorticidade  $y$  de água para  $S = 1$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ .

As Figs. 6.16(a-d) mostram a distribuição dos vetores velocidade no plano de saída do tubo da tomada. A visualização é em vista de topo, para  $S = 1$  e diversos valores de  $Q$ :  $0,0015$ ;  $0,00105$ ;  $0,00079$  e  $0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . Comparando-se os diversos casos pode-se observar que as maiores velocidades são aquelas apresentadas na Fig. 6.16(a), justamente o caso mais crítico em relação à possibilidade de formação de vórtice correspondente, com  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nas Figs. 6.16(a-d) também é possível observar a excentricidade do vórtice formado na saída do tubo da tomada. Outra observação importante verificada nos resultados destas figuras é o sentido de giro, o qual se manteve no sentido horário. Resultados onde indicam este sentido de giro foram apresentados LI et al. (2008).

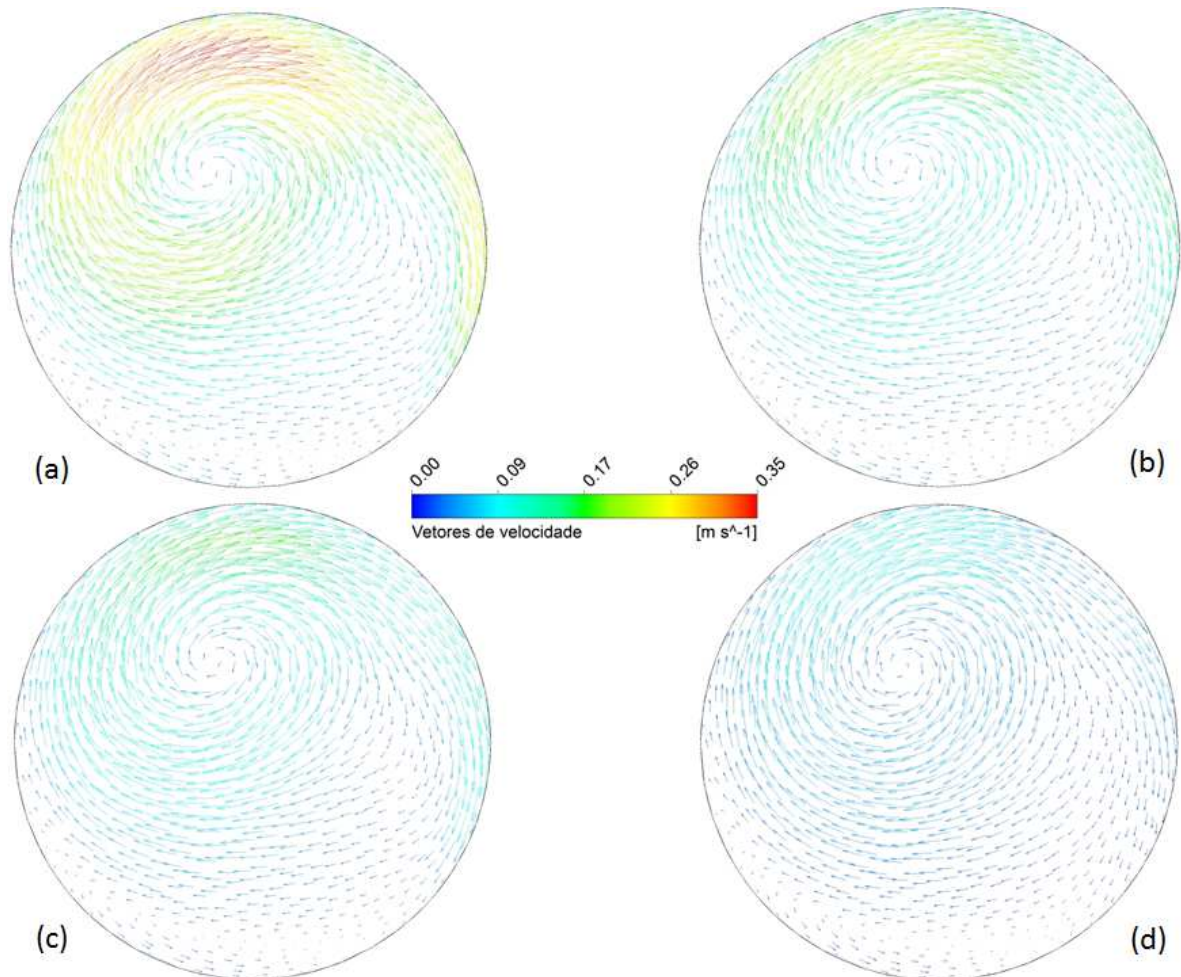


Figura 6.16 - Vetores de velocidade de água na saída do tubo da tomada para  $S=1$ : (a)  $Q=0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b)  $Q=0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c)  $Q=0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$  e (d)  $Q=0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Nas Figs. 6.17(a-d) são apresentados resultados de campo de vorticidade no plano da saída do tubo da tomada d'água. Todos os resultados foram obtidos com a mesma escala. Os valores negativos na escala representam o sentido do campo de vorticidade em relação ao eixo  $y$ , que neste caso significa sentido horário segundo regra da mão direita. Já os valores positivos na escala representam a intensidade e sentido do campo de vorticidade em relação ao eixo  $y$  em sentido anti-horário.

Na Fig. 6.17(a) há dois pontos onde há concentração de vorticidade no plano. Nas Figs. 6.17(b-c) há duas regiões de vorticidade concentradas, porém com menor intensidade, se comparadas a Fig. 6.17(a). Na Fig. 6.17(d) há uma distribuição mais uniforme de vorticidade no plano de saída do tubo, porém, com intensidade menor. Isto pode estar relacionado com  $Q$ , que decresce de  $0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 6.17(a)) até  $0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$  (Fig. 6.17(d)).

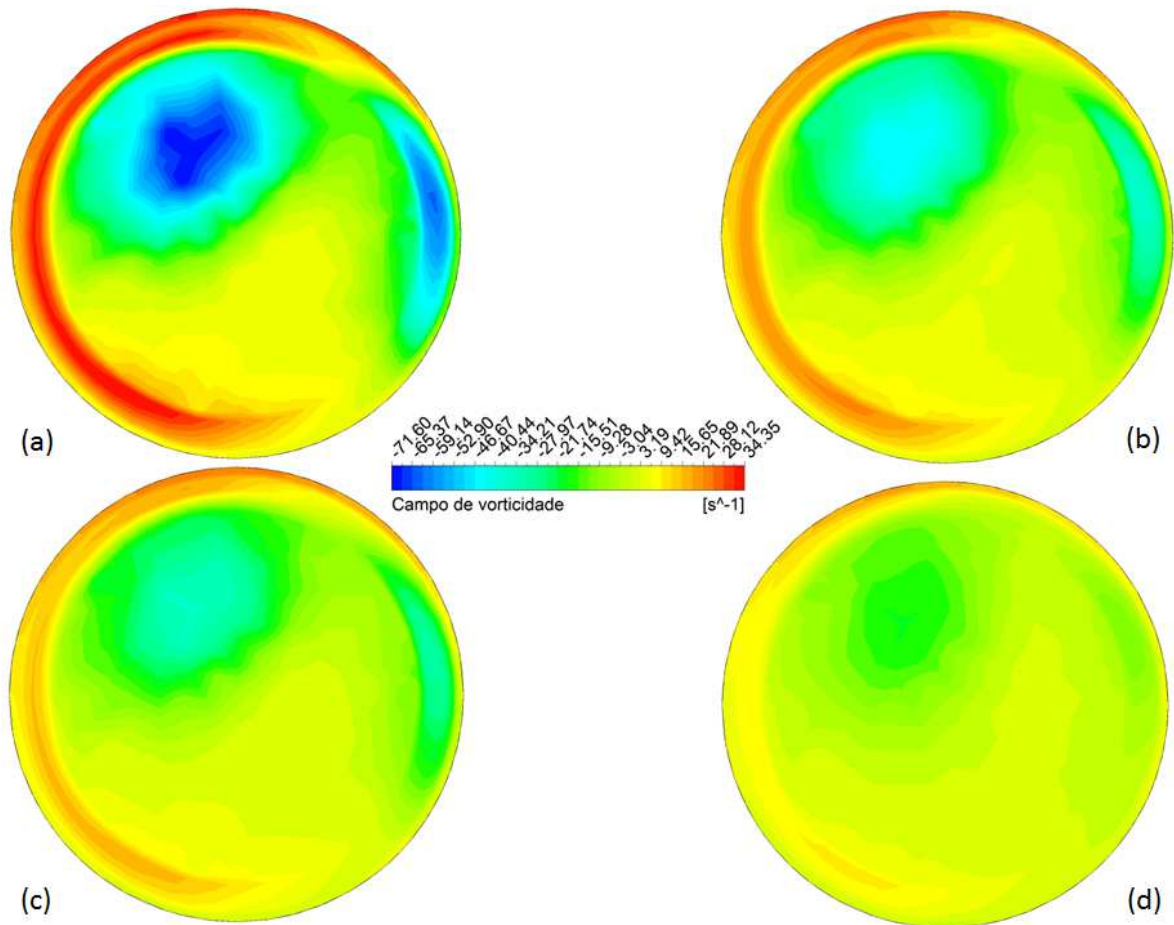


Figura 6.17 - Campo de vorticidade em plano na saída do tubo para  $S = 1$ : (a)  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b)  $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c)  $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$  e (d)  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A vorticidade média no plano de saída do tubo da tomada é analisada na Fig. 6.18. Para esta figura foram relacionados os adimensionais  $Fr$  e vorticidade adimensional ( $\zeta^*$ ), para as condições operacionais de:  $S = 1 D$ , com  $Q = 0,0015$ ;  $0,00105$ ;  $0,00079$  e  $0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ . Os resultados verificados nesta figura mostram que com aumento de  $Fr$  há uma tendência de aumento de vorticidade.

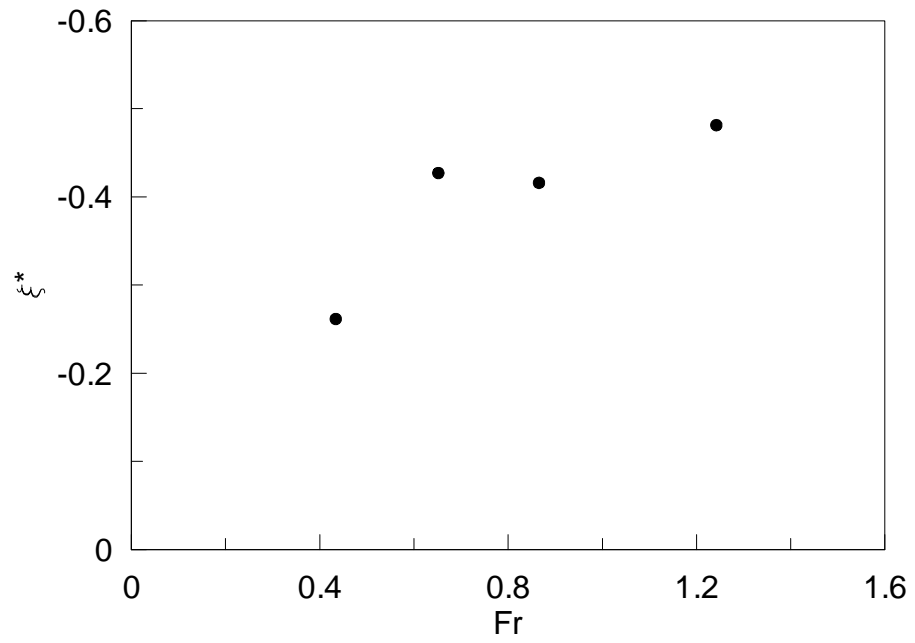


Figura 6.18 - Vorticidade média em plano na saída do tubo da tomada em relação a  $Fr$ .

## 7 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho foi reproduzir numericamente a formação de vórtices em tomada d'água. Para atingir os objetivos foi utilizado o software comercial ANSYS-CFX como ferramenta principal de trabalho. Em seus módulos foram desenvolvidas as geometrias, as malhas computacionais e os diferentes modelos matemáticos testados. O modelo matemático é bifásico e tridimensional, contemplando as equações de conservação de massa, quantidade de movimento e modelo de turbulência.

Diferentes tipos/configurações de malhas computacionais foram testadas. Neste caso, a abordagem apresentada no processo de validação espacial e temporal indicou o tipo de malha onde foi possível obter resultados que foram evidenciados a formação de vórtices nos casos de  $Q$  e  $S$  apresentados.

Com a utilização de malhas e modelo numérico validado, foi possível visualizar isosuperfície de fração volumétrica de água com depressão na região da tomada d'água e comparar com os resultados experimentais. Neste caso foi possível identificar a semelhança dos resultados nestes dois tipos de abordagem.

Na região da tomada de água as linhas de corrente obtidas nos casos estudados sugerem velocidades que indicam a influência desta variável na formação de vórtice, como previsto por ASCE (1995), apresentado no Capítulo 3.

Na análise dos resultados com visualização do campo de velocidade em plano no interior do duto da tomada foi possível verificar o giro e intensidade da variável velocidade, demonstrando também o sentido de giro no escoamento, concordando com resultados obtidos por outros autores estudados.

Os resultados apresentados de campos de vorticidade e velocidade, isosuperfície de fração volumétrica são animadores, pois indicam que o modelo numérico proposto é capaz de representar adequadamente a formação de vórtices. Estes resultados do estudo de caso são de grande importância, por tratar-se de matéria ainda pouco explorada e de bons resultados na literatura.

## **8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Como continuidade de trabalho sugere-se considerar a possibilidade de simular diferentes condições operacionais para diferentes posições de tomada, tais como: vertical simétrica, horizontal assimétrica e simétrica.

## REFERÊNCIAS

ANSYS CFX, **Manual do usuário**, versão 14.0.

ASCE. 1995. **Guidelines for Design of Intakes for Hydroelectric Plants**. Committee on Hydropower Intakes of the Energy Division of the American Society of Civil Engineers, Estados Unidos da América.

BATCHELOR, G. K. **An Introduction to Fluid Dynamics**. 11 ed. Edt. Cambridge Mathematical Library: New York, 2009.

CELIK, I. B. **Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFC Applications**. Journal of Fluids Engineering. ASME, Vol.130/078001-1-4, 2008.

CHEN, Y. **Three-dimensional Numerical Simulation of Vertical Vortex at Hydraulic Intake**. International Conference on Modern Hydraulic Engineering. Chengdu, 2012

ÇENGEL, A YUNUS; CIMBALA M. JOHN , **Mecânica dos Fluidos, Fundamentos e Aplicações**. 1ª ed. Edt. McGraw-Hill. São Paulo 2007.

DAGGETT, L. L. e KEULEGAN G. H., 1974 – **Similitude in free surface vortex formation**. **Journal of Hydraulic Division**, Vol. 100, n.11, p. 1565– 1581.

ESHA. 2004. **Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant**. ESHA.

FOX, ROBERT W.; MACDONALD, ALAN T., **Introdução a Mecânica dos Fluidos**. 7 ed. Edt. LTC. Rio de Janeiro 2011.

GASKIN, S. J. **Predicting Vortex Stretching at Hydropower Intakes**. Water Engineering for a Sustainable Environment: Canada, 2009.

GORDON, J. L. (1970) **Vortices at intakes**. Water Power, n.22, p. 137-138, april.

GULICK, F. S.- **Experimental and Numerical Analysis of Free Surface Vortices at a Hydropower Intake**. International Conference on HydroScience and Engineering: Philadelphia, 2006.

GULLIVER, J. S., RINDELS, A. J., LINDBLOM, K. C., 1986 - **Designing intakes to avoid free-surface vortices**. International Water Power & Dam Construction, v.38, n.9, p.24-28.

HECKER, G. E. – **Model Prototype Comparison on Free Surface Vortices**. Journal of the Hydraulic Division, Vol. 107, n 10, p. 1234 – 1259, 1981.

HOLLWEG, F. R. **Análise Numérica Sobre a Influência de Variações da Seção Transversal de Microcanais no Escoamento Laminar**. Dissertação de Mestrado – PPG Engenharia Mecânica, Unisinos, São Leopoldo, RS, 2012.

JAIN, A. K. e RAJU, K. G. R., 1978 - **Vortex formation at vertical pipe intakes**. Journal of Hydraulic Division, Vol. 104, n 10, p. 1429-1445.

JONES, M. G. **Pumping Station Design**. (3<sup>a</sup> ed.). San Diego, California: BH, 2008.

KNAUS, J., (editor, coordinator) **Swirling Flow Problems at Intakes**. IAHR, with contributions by E. CHANG, G. E. HECKER, J. KNAUSS, M. PADMANABHAN, K. G. RANGA RAJU, R. J. GARDE, P. RUTSCHMANN, P. VOLKART and D. VISCHER, Balkema Press, Rotterdam, 1987.

LI, H, F - **Experimental And Numerical Investigation Of Free Surface Vortex**. Journal of hydrodynamics, 20(4):485-491, China: 2008.

MELATTE, A. K. **Formação de Vórtices em Tomadas D'Água de Usinas Hidrelétricas**. Artigo de congresso VII Citenel, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

NAKAYAMA, A. **Large Eddy Simulation of Vortex Flow in Intake Channel of Hydropower Facility**. Kobe, Japão, 2010.

PADMANABHAN, M. e HECKER, G. E., 1984 - **Scale effects in pump sump models**. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 110, n.11, p.1540-1556.

PEREIRA, A. L. C. – **Eficiência Hidrodinâmica e Otimização no Projeto de Aproveitamentos Hidroelétricos**. Dissertação de Mestrado – Engenharia Civil – Instituto Superior Técnico – Lisboa, 2010.

RAMOS, H. 2000. **Guidelines for Design of Small Hydropower Plants**. Book published by WREAN (Western Regional Energy Agency and Network) and DED (Department of Economic Development - Energy Division). Belfast, North Ireland.

SARAIVA, L. S. **Estudo das Condições de Formação de Vórtices em Tomadas D'Água Verticais de Usinas Hidrelétricas**. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos: Bento Gonçalves (RS), 2013.

SILVEIRA NETO, A., 2002b, **Simulação de Grandes Escalas de Escoamentos Turbulentos**. In A. P. S. Freire, P. Menut, and J. Su (Eds.), Turbulência, Volume 1, pp. 157–188. ABCM, Rio de Janeiro.

Usina Hidrelétrica de Tucuruí. Disponível em: <[http://cidadedetucuruí.com/inicio/usina\\_hidreletrica\\_tucuruí/USINA\\_HIDRELETRICA\\_TUCURUI.htm](http://cidadedetucuruí.com/inicio/usina_hidreletrica_tucuruí/USINA_HIDRELETRICA_TUCURUI.htm)>. Acesso em: 16 jan 2013.