



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

Numerical simulation to study the vortices formation in water intakes at hydroelectrics

S. L. Neves<sup>1</sup>; M. D. Corte<sup>1</sup>; R. de C. Oliveski<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PPG Engenharia Mecânica/Labsin, Unisinos, 93022000, São Leopoldo-RS, Brasil

*decesaroo@gmail.com*

*(Recebido em 15 de setembro de 2014; aceito em 29 de dezembro de 2014)*

No Brasil, a energia hidráulica é a principal fonte de geração de energia elétrica. Apesar da tendência de aumento na utilização de outras fontes, a energia hidráulica continuará sendo a principal fonte na matriz energética. A eficiência de uma usina hidrelétrica pode ser afetada pelas condições de alimentação de água para sua tomada d'água. A formação de vórtices a montante das tomadas d'água são causas de perda de eficiência e podem causar danos nas instalações. O objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno de formação de vórtices em tomadas d'água de hidrelétricas por meio de simulação numérica tridimensional com o software comercial ANSYS-CFX, com base nos estudos realizados em modelo experimental pelo IPH-UFRGS. Foram analisados casos com diferentes submersão e vazão volumétrica. O modelo matemático é composto pelas equações da conservação da massa e quantidade de movimento do campo médio, equação da fração volumétrica, equações do modelo de turbulência, assim como de suas respectivas condições de contorno e iniciais. Os resultados mostram que o modelo numérico é capaz de reproduzir a formação de vórtices em tomadas d'água, conforme observado no modelo experimental.

Palavras-chave: CFD, submersão, vórtice, tomada d'água.

In Brazil, hydropower is the main source of electricity generation. Despite the increasing trend in the use of other sources, hydropower will remain the main source in the energy matrix. The efficiency of a hydroelectric plant may be affected by conditions of water supply into the intake. The formation of vortices upstream of water intakes are causes of loss of efficiency and can cause damage to the facilities. The objective of this work is to study the phenomenon of vortex formation in intakes of hydropower through three-dimensional numerical simulation in commercial software ANSYS-CFX, based on studies in experimental model by IPH-UFRGS. Cases with different submergence and volumetric flow rate were analyzed. The mathematical model consists of the equations of conservation of mass and momentum of the mean field, the volume fraction equation, equations of the turbulence model, as well as their respective initial and boundary conditions. The results show that the numerical model is able to reproduce the formation of vortices in water intakes, as observed in the experimental model.

Keywords: CFD, submergence, vortex, water intake

## 1. INTRODUÇÃO

A tomada de água de uma usina hidrelétrica é a estrutura que conduz o escoamento de rios, reservatórios ou canais para o interior de condutos, alimentando as turbinas para geração de energia elétrica.

As tomadas devem ser projetadas e construídas para funcionar ininterruptamente, em qualquer época do ano, e para condições operacionais previamente definidas (nível mínimo a montante e vazão máxima aduzida). Quando aparecem vórtices com arraste de ar, ocorre uma redução na vazão líquida na tomada, o que provoca uma perda da eficiência da turbina e, conseqüentemente, uma redução no valor da potência, além de provocar vibração em comportas e outros equipamentos do sistema conforme [1].

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 vórtice. 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 conforme [2]

Dentre as características para um projeto eficiente está a prevenção contra a formação de vórtices. Um 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 conforme [2]. A vorticidade é uma grandeza vetorial que 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 característica 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.

Conforme [3], os vórtices podem ser classificados de acordo com sua intensidade como mostra a Figura 1. Os vórtices que devem ser evitados em instalações de usinas hidrelétricas são os de tipo 3, 4, 5 e 6. Os vórtices de tipo 3 a 5 são de menor intensidade, pois não induzem um arraste de ar em seu núcleo até a tomada d'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 d'água com presença de ar interferindo no escoamento d'água, podendo causar danos ao sistema.

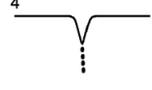
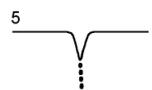
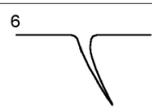
Tipo de vórtice	Descrição
1 	Rotação superficial sem depressão
2 	Depressão superficial
3 	Núcleo sem presença de ar
4 	Sucção de partículas flutuantes, mas não ar
5 	Bolhas de ar engolidas pela tomada
6 	Núcleo de ar completamente desenvolvido até a tomada

Figura 1 - Tipos de vórtices.

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

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 submersão mínima ( $h$ ), (Figura 2).

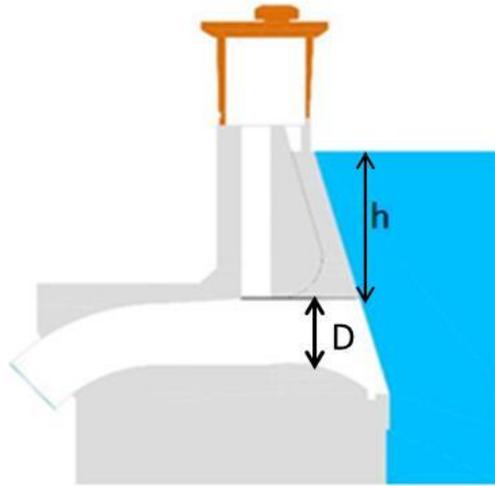


Figura 2 – Esquema de tomada de água com indicação de submersão mínima.  
(Fonte: Saraiva et al., 2013)

Definir a submersão adequada da tomada de água, assim como evitar velocidades e geometrias que possam causar separação do escoamento são as formas mais simples de evitar formação de vórtice. A submersão mínima tem papel fundamental na prevenção de formação de vórtices, pois minimiza a velocidade superficial e o potencial para desenvolvimento de turbulência. A submersão 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 [2].

A submersão ( $h$ ) 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 submersão é através da sua adimensionalização com o diâmetro da tomada, chamada de submersão relativa mínima, conforme pode ser visto na Equação 1:

$$S = \frac{h}{D}, \quad (1)$$

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

Os custos de implantação de usinas hidrelétricas são diretamente proporcionais a submersão 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.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho consiste em reproduzir numericamente o escoamento em uma tomada d'água vertical assimétrica de um modelo experimental, conforme mostra o esquema da Figura 3.

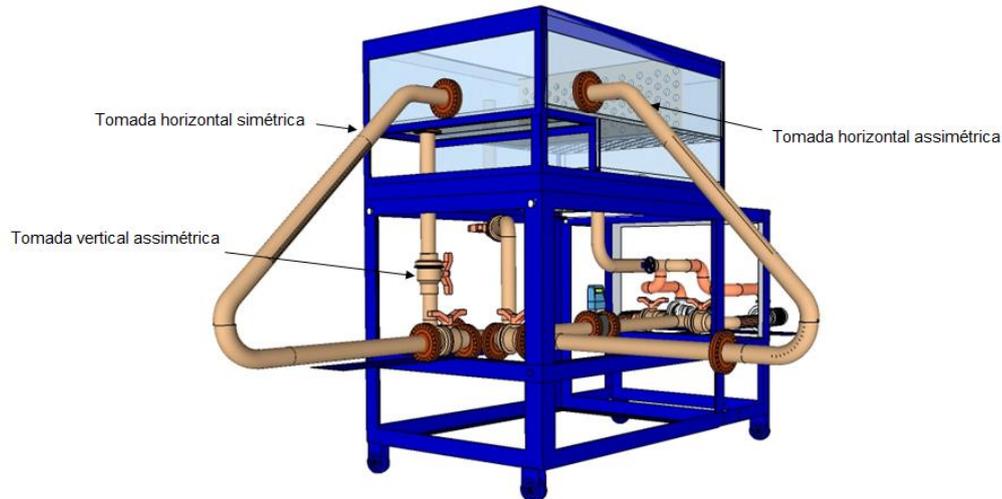


Figura 3 - Modelo experimental LOH2 do IPH-UFRGS.  
(Fonte: Melatte et al., 2013)

O modelo consiste em um tanque retangular com comprimento de 1,5 m e largura de 0,75 m. A tomada d'água é circular com diâmetro de 0,048 m. O duto a jusante da tomada d'água possui comprimento de 0,072 m. A vazão volumétrica utilizada é relacionada com a submergência utilizada em cada simulação numérica. O domínio de análise deste trabalho consiste em uma geometria retangular, de comprimento  $L$ , largura  $W$  e altura  $H$ , conforme mostrado na Figura 4. 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 Figura 4.

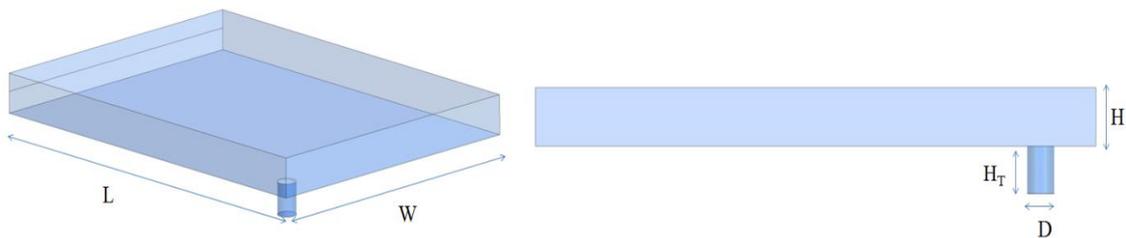


Figura 4 - Domínio de cálculo da tomada vertical assimétrica: (a) vista em perspectiva e (b) vista lateral.

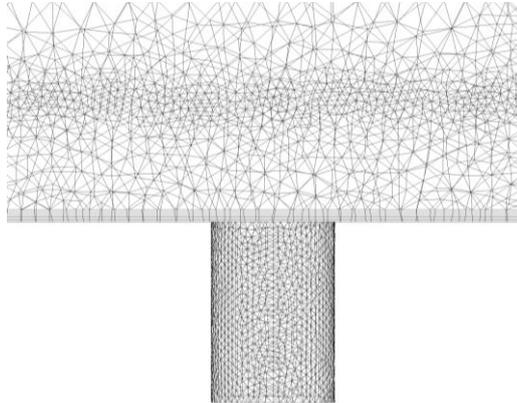
As dimensões do domínio de cálculo da tomada de água vertical assimétrica são apresentadas na Tabela 1. Em todos os casos, a altura da camada de ar acima da camada de água é igual a 0,04 m.

Tabela 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

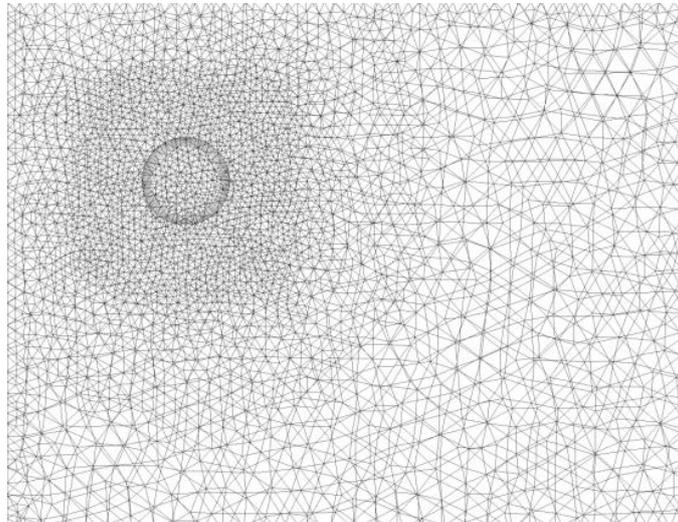
A malha computacional é do tipo tetraédrica, com aproximadamente  $4,4 \times 10^6$  elementos, construída no software ANSYS ICEM-CFD. A Figura 5 apresenta uma vista lateral do domínio computacional para  $S = 1$ . Nesta figura pode-se identificar o refino na região de interface água-ar e próximo as paredes sólidas. O refinamento da malha na região de interface água-ar é

importante, pois é nesta região que se espera a ocorrência de vorticidade. Na região junto às paredes de fundo, laterais e duto foi aplicada uma camada de elementos prismáticos, pois nestas regiões há uma condição de não escorregamento, provocando grandes gradientes de velocidade.



*Figura Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento. - Vista lateral da tomada vertical assimétrica.*

Através das Figuras 6 e 7 pode-se observar que foi aplicado um refinamento na região próxima às paredes do tubo de saída. A região da malha próxima ao duto da tomada d'água representa o ponto da geometria onde pode ocorrer a formação de vórtice. Neste ponto, os resultados das variáveis velocidade e pressão 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 6 - Vista superior da tomada vertical assimétrica.*



*Figura 7 - Vista em perspectiva tomada vertical assimétrica para  $S = 1$ .*

O modelo matemático utilizado é bifásico homogêneo com superfície livre, conforme [4], composto pelas equações de conservação da massa e quantidade de movimento do campo médio, pela equação da fração volumétrica para uma das fases e pelas equações do modelo de turbulência, as quais são apresentadas na sequência.

$$\frac{\partial(r_\alpha \rho_\alpha)}{\partial t} + \nabla(r_\alpha \rho_\alpha U) = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial(r_\beta \rho_\beta)}{\partial t} + \nabla(r_\beta \rho_\beta U) = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho_m U)}{\partial t} + \nabla(\rho_m U U - \mu_{eff}(\nabla U + (\nabla U + (\nabla U)^T))) = S_M - \nabla p, \quad (4)$$

$$\frac{\partial(r_\alpha)}{\partial t} + \nabla(r_\alpha U) = 0, \quad (5)$$

$$r_\alpha + r_\beta = 1, \quad (6)$$

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:

$$p' = p + \frac{2}{3} \rho k, \quad (7)$$

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

$$\rho_m = r_\alpha \rho_\alpha + r_\beta \rho_\beta, \quad (8)$$

$$\mu_{eff} = \mu_m + \mu_t, \quad (9)$$

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

$$\mu_m = r_\alpha \mu_\alpha + r_\beta \mu_\beta. \quad (10)$$

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

$$S_M = (\rho - \rho_{ref})g, \quad (11)$$

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.

As simulações foram realizadas em regime transiente. No entanto, em todos os casos foi feita uma simulação preliminar em regime permanente. Os resultados das simulações em regime permanente foram utilizados como condição inicial para as simulações em regime transiente. Por ser simples e robusto, o modelo de turbulência utilizado nas simulações em regime permanente foi o  $\kappa - \varepsilon$ . No entanto, para as simulações em regime transiente, o modelo de

turbulência utilizado foi o SST (Shear-Stress Transport). Para ambos modelos foram utilizados os parâmetros sugeridos no manual do software ANSYS-CFX.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados foram obtidos de simulações em regime transiente, onde são mostradas isosuperfícies de fração volumétrica ( $r$ ) da água, campos de vorticidade em relação ao eixo cartesiano  $y$  e vetores de velocidade no plano na saída do tubo da tomada. A isosuperfície de fração volumétrica da água refere-se à variação de altura da interface ar-água.

Como pode ser observado na Figura 8(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 (Figura 8(a)). O resultado reproduz um vórtice completamente desenvolvido com núcleo de ar que pode ser classificado como tipo 6, conforme classificação mostrada na Figura 1.

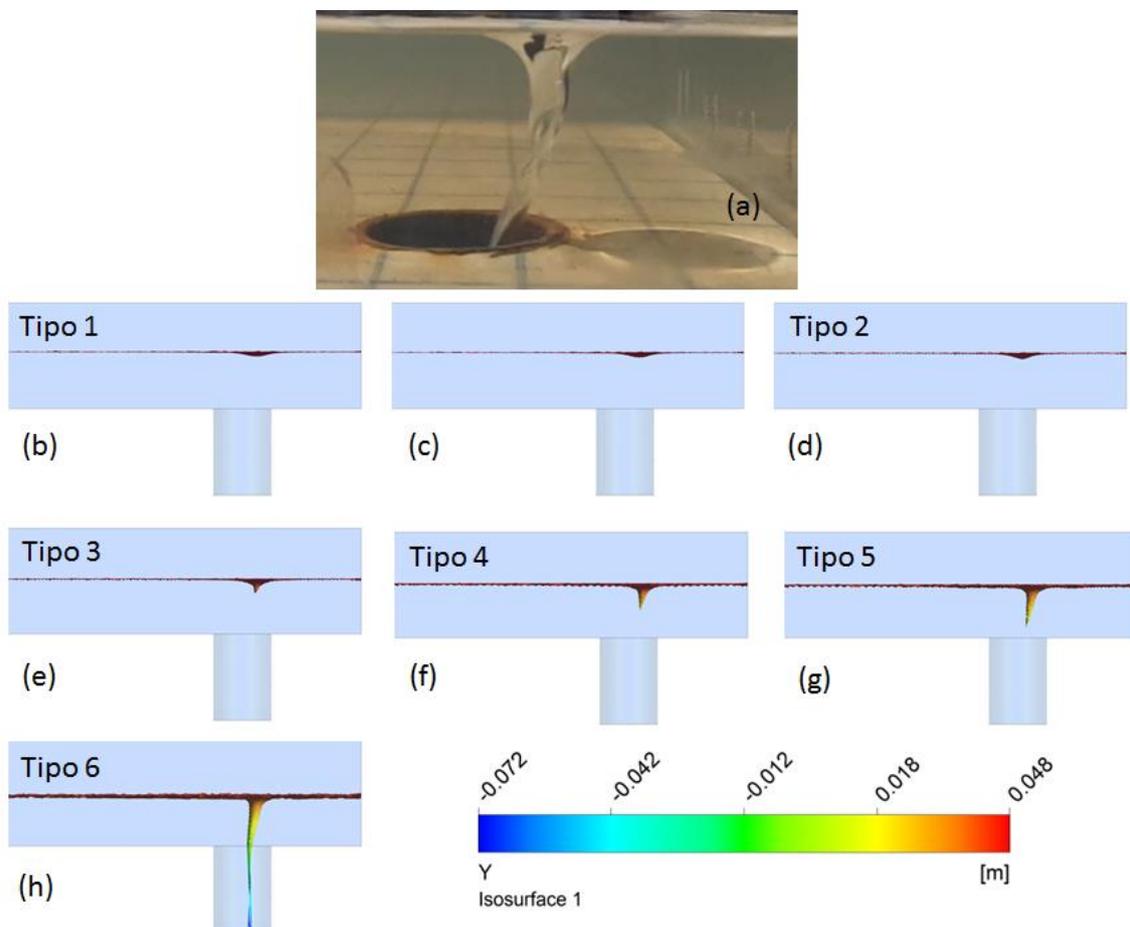


Figura 8 - Vista lateral de vórtice formado no modelo experimental (a), Isosuperfície de  $r$ : (b) 0,50; (c) 0,60; (d) 0,70; (e) 0,80; (f) 0,90; (g) 0,95; (h) 0,98.

A Figura 9 mostra a vorticidade  $y$  da água para o caso com  $S = 1$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , em um plano  $zx$  a  $0,048 \text{ m}$  no sentido positivo de  $y$  e acima do fundo do tanque. Na Figura 9(a) é possível visualizar a vorticidade  $y$  em toda extensão da tomada de água. O detalhe "A", indicado na figura, evidencia a intensidade maior da vorticidade  $y$  negativa na região da tomada d'água, o que indica uma rotação em sentido horário em relação ao eixo  $y$ . No detalhe "A" da Figura 9(b) também é possível identificar vorticidade nas regiões próximas às paredes do domínio, porém com sinal positivo e de menor intensidade.

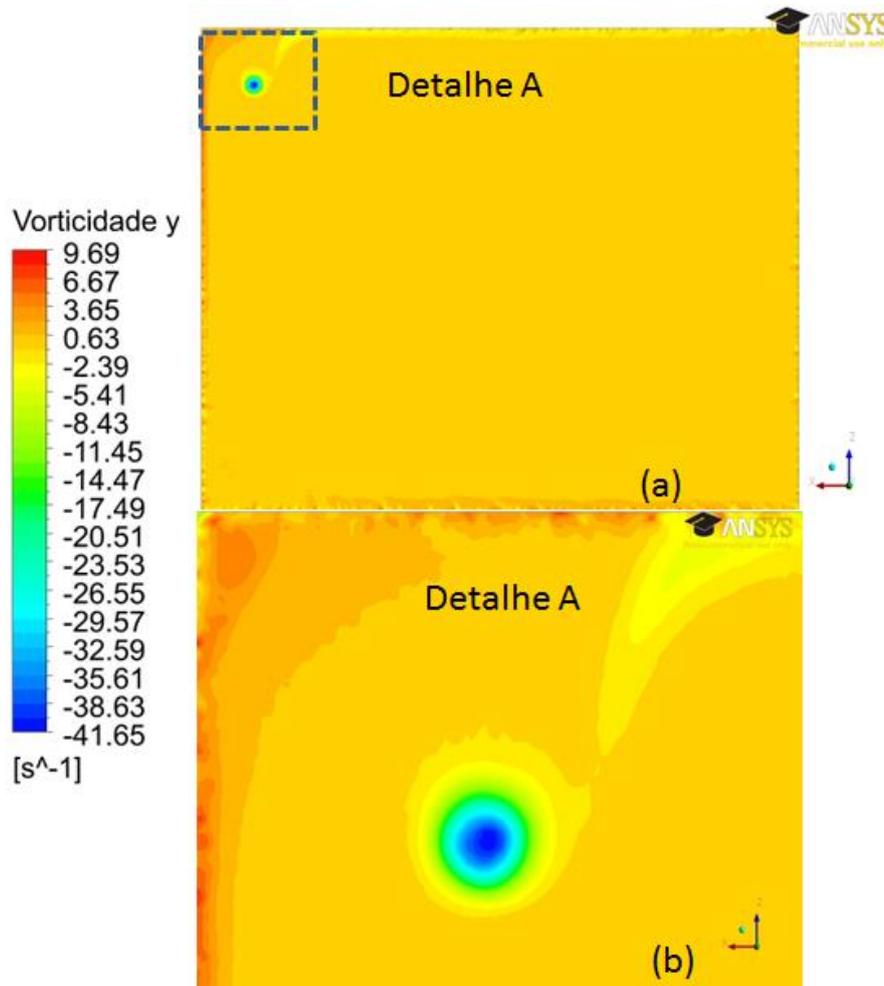


Figura 9 – Vorticidade  $y$  de água para  $S = 1$  e  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ .

A Figura 10 mostra a distribuição dos vetores de velocidade no plano de saída do tubo da tomada. A visualização é em vista de topo, para  $S = 1$  e diversos valores de  $Q$ : (a) 0,0015; (b) 0,00105; (c) 0,00079 e (d) 0,00053  $\text{m}^3/\text{s}$ . Comparando-se os diversos casos pode-se observar que as maiores velocidades são aquelas apresentadas na Fig. 10(a), justamente o caso mais crítico em relação à possibilidade de formação de vórtice.

Na Figura 10 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.

Na Figura 11 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 Figura 11(a) há dois pontos onde há concentração de vorticidade no plano. Na Figura 11(b-c) há duas regiões de vorticidade concentradas, porém com menor intensidade, se comparadas a Figura 11(a). Na Figura 11(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  $\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 11(a)) até 0,00053  $\text{m}^3/\text{s}$  (Figura 11(d)).

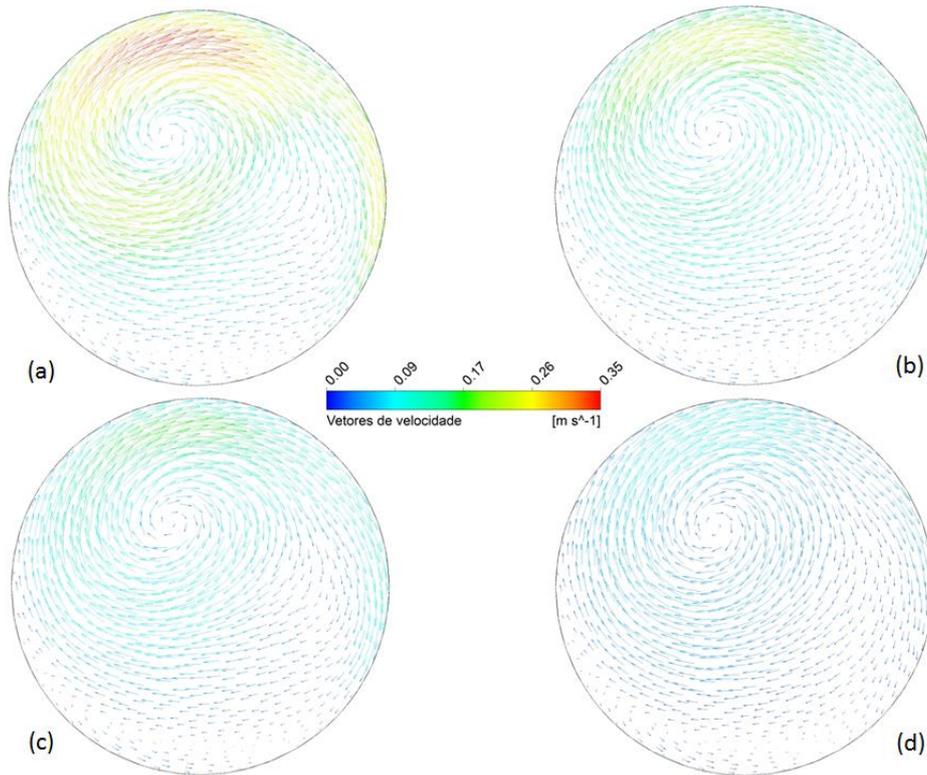


Figura 10 - Vetores de velocidade de água na saída do tubo da tomada para  $S=1$ : (a)  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b)  $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c)  $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$  e (d)  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ .

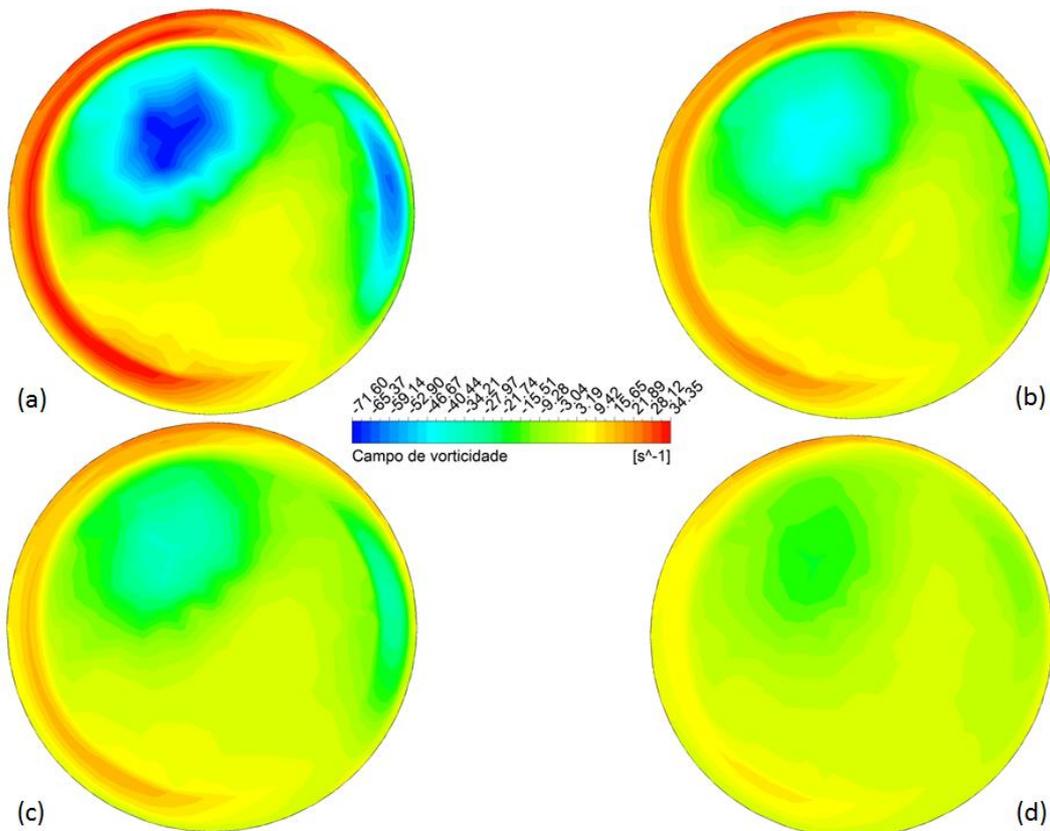


Figura 11 - Campo de vorticidade em plano na saída do tubo para  $S=1$ : (a)  $Q = 0,0015 \text{ m}^3/\text{s}$ , (b)  $Q = 0,00105 \text{ m}^3/\text{s}$ , (c)  $Q = 0,00079 \text{ m}^3/\text{s}$  e (d)  $Q = 0,00053 \text{ m}^3/\text{s}$ .

#### 4. 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.

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 análise dos resultados com visualização do campo de velocidade em plano no interior do duto da tomada foi possível verificar o sentido de giro e a intensidade rotação do escoamento.

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.

#### 5. AGRADECIMENTOS

CAPES, FAURGS, UNISINOS.

#### 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ferreira LMC, Genovez AIB. Critérios de Semelhança na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e V Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos países de Língua Oficial Portuguesa. Aracaju, 25 a 29 nov, Anais em CDROM. 2001.
2. 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.
3. Padmanabhan M, Hecker GE. Scale effects in pump sump models. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1984; 110(11):1540-1556.
4. ANSYS CFX. Manual do usuário, versão 14.0.
5. Melatte AK. Formação de Vórtices em Tomadas D'Água de Usinas Hidrelétricas. Artigo de congresso VII Citenel, UFRGS, Porto Alegre, 2013.