XX SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS
ÁGUA • DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIOAMBIENTAL
17 – 22 DE NOVEMBRO DE 2013 – BENTO GONÇALVES / RS
ABRH
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS

ESTUDO DAS CONDIÇÕES DE FORMAÇÃO DE VÓRTICES EM TOMADAS D'ÁGUA VERTICAIS DE USINAS HIDRELÉTRICAS PARTE I: MODELAÇÃO FÍSICA

Lorena S. Saraiva [1], Mariane Kempka[2], Leandro E. S. Soares[3], Cássius Palauro[4], Marcelo Dalla Corte[5], Sérgio L. Neves[6], Alba V. B. Canellas[7], Marcelo G. Marques[8], Rejane D. Oliveski[9], Luiz A. M. Endres[10], Edith B. C. Schettini[11], Mauricio Daí Prá[12]

Resumo – Uma das condições de funcionamento e operação eficiente de tomadas d'água de usinas hidrelétricas é prevenção de formação de vórtices, A entrada de ar na tubulação por meio da formação de vórtices pode acarretar diversos problemas hidráulicos tais como diminuição do rendimento de máquinas hidráulicas diminuição do coeficiente de descarga, cavitação, vibrações, entre outros. A ocorrência de escoamento com vorticidade está associada especialmente à submergência, parâmetro que depende de uma série de outros fatores, entre eles diâmetro utilizado na tomada d'água, velocidade no interior do conduto, ângulo de aproximação do escoamento, números de Froude da tomada (F_d), de Reynolds da tomada (Re_d) e de Weber da tomada (We_d). No projeto de tomadas d'água, um grande desafio é a prevenção da formação de vórtices, pois devido à complexidade desse fenômeno, as condições que determinam sua ocorrência não são completamente conhecidas. Este trabalho tem como objetivo abordar as condições que favorecem a formação de vórtices em tomadas d'água verticais, através da coleta e análise de dados em modelo físico reduzido e na simulação numérica.

Palavras-Chave – Tomada d'água, vórtices, modelo experimental.

A STUDY OF THE CONDITIONS OF VORTEX FORMATION IN VERTICAL HYDROPOWER WATER INTAKES

Abstract – One of the conditions of operation and efficiency in operation of water intakes for power plants is the air intake pipe through the formation of vortices, which can cause many problems such as decreased hydraulic discharge coefficient, cavitation, vibration, noise, among others. The occurrence of flow vorticity is associated notably with the submergence, a parameter which depends on a number of other factors including diameter used in the water intake, velocity inside the duct, approach flow angle, Froude (F_d), Reynolds (Re_d) and Weber (We_d) numbers. In the design of water intakes, a major challenge is to prevent the formation of vortices due to the complexity of this phenomenon, the conditions for its occurrence are not fully known yet. This paper aims to address the conditions that favor the formation of vortices at vertical intakes, through the collection and analysis of data in reduced physical model and numerical simulation.

Keywords – Water intake, vortices, experimental model.

[1] Trabalha na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, lorenassaraiva@gmail.com.
[2] Trabalha na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, kempka.mariane@gmail.com.
3 Trabalha na Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, leandro.es.soares@gmail.com.
4 Trabalha na Fundação de Apoio a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, cassiuspalauro@gmail.com.
5 Trabalha na Universidade do Vale do Rio do Sinos, marcelodallacorte@gmail.com.
6 Trabalha na Universidade do Vale do Rio do Sinos, neves.lsergio@gmail.com.
7 Trabalha em Furnas Centrais Elétricas S.A., alba@furnas.com.br..
8 Trabalha na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mmarques@iph.ufrgs.br.
9 Trabalha na Universidade do Vale do Rio do Sinos; decesaroo@gmail.com.
10 Trabalha na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, endres@ufrgs.br.
11 Trabalha na Universidade Federal do Rio Grande do Sul; bcamano@iph.ufrgs.br.
12 Trabalha na Universidade Federal do Pelotas; mdaipra@gmail.com

INTRODUÇÃO

Em uma usina hidrelétrica a geração de energia pode sofrer redução em função da presença de vórtices, que pode causar uma queda do rendimento da turbina devido à redução do coeficiente de descarga da tomada e ao aumento da perda de carga ao longo do conduto de adução. Além do aparecimento de ruídos e de vibrações indesejadas, em alguns casos pode vir a ocorrer cavitação junto à turbina. Conforme Ferreira e Genovez (2001), quando aparecem vórtices com arraste de ar a redução na vazão pode chegar a 50%, a perda da eficiência na turbina pode chegar a 70% e a redução no valor da potência a 50%. Na formação dos vórtices diversos fatores influenciam entre eles o diâmetro da tomada de água (d), o ângulo de aproximação do escoamento (α), os valores dos números de Froude (F_d), de Reynolds (Re_d) e de Weber (We_d) do escoamento no interior da tomada de água. As equações representativas dos números adimensionais podem ser observadas na Tabela 1.

Tabela 1: Equações dos números adimensionais Froude, Reynolds e Weber no interior da tomada.

F_d	Reynolds	Weber
$\frac{v}{\sqrt[2]{g \cdot d}}$	$\frac{v \cdot d}{\mu}$	$v \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot d}{\sigma}}$
v velocidade média no interior da tomada d diâmetro da tomada μ viscosidade cinemática da água		σ Tensão superficial da água; ρ massa específica da água

Esse fato dificulta o prognóstico em estudos em modelo reduzido devido aos efeitos de escala oriundos da impossibilidade de redução simultânea das forças de viscosidade e de tensão superficial. Neste aspecto o uso de modelos numéricos pode vir a reduzir os efeitos de escala, entretanto é necessário verificar se as simulações com modelos numéricos estão aptas a reproduzir a formação e as características dos vórtices. Nesta linha de pensamento está sendo desenvolvido o projeto de P&D "Formação de Vórtices em Tomadas d'água de Usinas Hidrelétricas", uma parceria entre Furnas Centrais Elétricas e Universidade Federal do Rio Grande do Sul com apoio das Universidades Federal de Pelotas e do Vale do Rio dos Sinos. Essa pesquisa visa estudar a formação de vórtices em tomadas de água através da utilização de modelos numéricos e da sua comparação com os resultados obtidos em modelos físicos, a fim de orientar o dimensionamento e o planejamento da operação das tomadas de água de usinas hidrelétricas. Os custos de implantação de usinas hidrelétricas estão diretamente ligados à submergência da tomada de água e determinação do nível mínimo de operação, ou seja, quanto mais próxima da superfície livre do reservatório estiver localizada a tomada d'água, maior a economia na construção de obra, e maior poderá ser o volume útil armazenado de maneira geral. Por outro lado, quanto menor for a submergência, maior será a chance de ocorrência de vórtices Dessa forma, determinar o nível mínimo de água acima da tomada (submergência crítica), é de extrema importância, considerando este parâmetro em termos econômicos e de desempenho do aproveitamento.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A tomada d'água em uma usina hidrelétrica é um dos componentes do sistema de adução cuja finalidade é receber a massa de água e conduzi-la até a turbina onde haverá a conversão de energia hidráulica em energia mecânica. As tomadas de água são classificadas principalmente em relação à direção da adução (vertical e horizontal). No entanto, segundo Knauss (1987), essa classificação simplificada é insuficiente, fazendo-se necessária a utilização de critérios adicionais, relacionados a características particulares do arranjo da tomada de água em questão. O presente trabalho irá abordar as tomadas com captação vertical e sentido do escoamento para baixo. A escolha da

configuração específica de tomada de água deve ser feita de maneira criteriosa uma vez que a forma geométrica e a posição da captação de água estão relacionadas à tendência de formação, tipo e forma de vórtices. O vórtice é caracterizado por um fluido que apresenta escoamento rotacional no qual as linhas de corrente têm padrão espiral, ou circular, em torno de um eixo, em decorrência da conservação de momento angular. De acordo com Padmanabhan e Hecker (1983) e Knauss (1987) os vórtices podem ser classificados conforme apresentado na Figura 1. Destaca-se que para a operação eficiente das tomadas tolera-se vórtices até a classificação tipo 3.

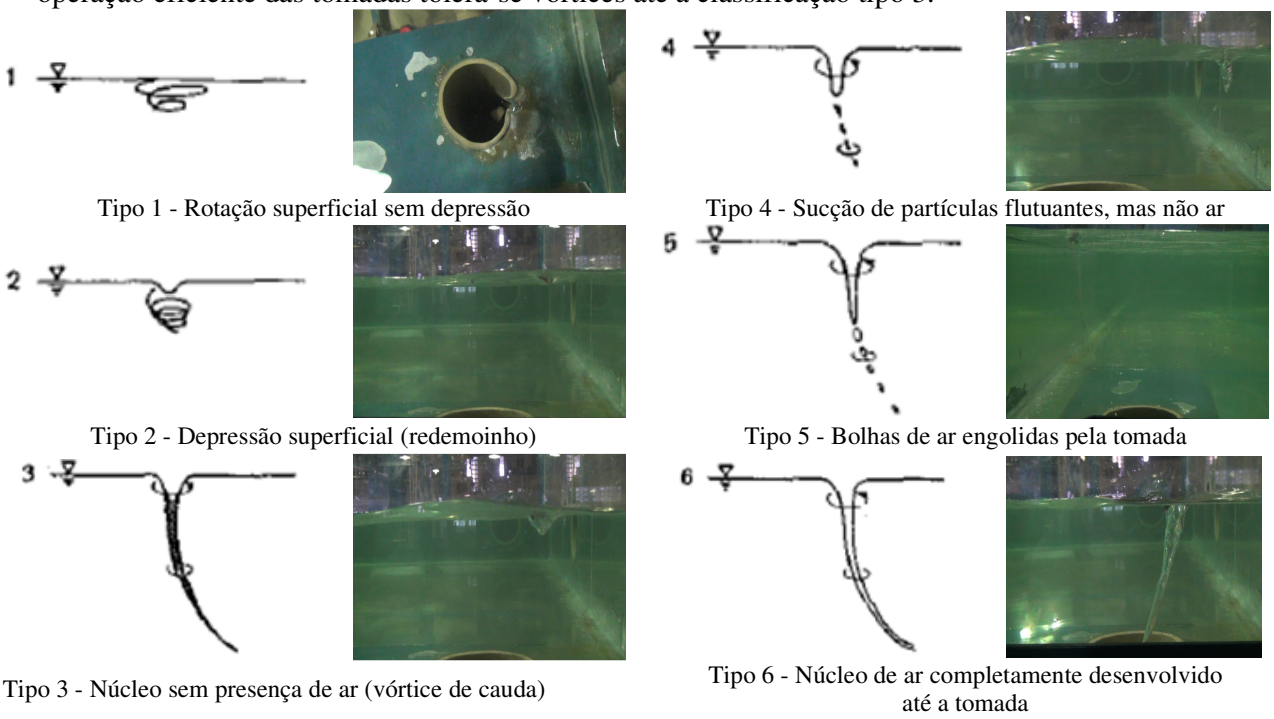


Figura 1:Classificação dos tipos de vórtice conforme Padmanabhan e Hecker (1983).

O parâmetro mais importante a ser estudado no fenômeno de formação de vórtices é a altura de coluna de água acima da tomada de água denominada submergência (H para vertical e S para horizontal e inclinada), conforme na Figura 2. Diversos autores têm estudado através da modelação física a formação de vórtices em tomadas de água verticais (objeto do presente trabalho): Jain (1978), Blaisdell (1989), Hecker (1987), Knauss (1987), Gulliver et. al. (1983), Ferreira et. al. (2000), Ferreira e Genovez (2001 e 2005), Werth e Frizzell (2009) apud Silva (2012), entre outros. A Tabela 2 apresenta as recomendações feitas para que não ocorra a formação de vórtices em tomada verticais conforme Jain (1978), Knauss (1987) e Ferreira e Genovez (2005). Pode-se observar que não há um consenso entre estes critérios de previsão.

Tabela 2: Equações sugeridas para tomadas verticais para a não formação de vórtices.

Autor	**Previsão da submergência**
Jain (1978)	$H/D \geq 4{,}5.F_d^{0,5}$
Knauss (1987)	$1 \leq H/D \leq 1{,}5$ para $F_d \leq 0{,}33$ $H/D \geq 0{,}5 + 2.Fr$ para $F_d > 0{,}33$
Ferreira e Genovez (2005)	$H/D \leq 0{,}5$ Vórtice com arraste de ar $H/D \geq 3{,}0$ não há formação de vórtice

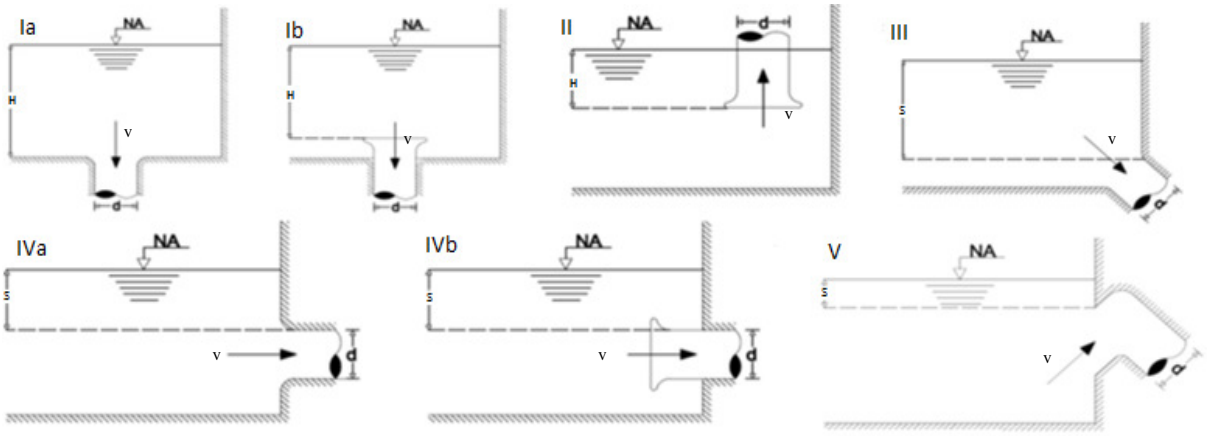
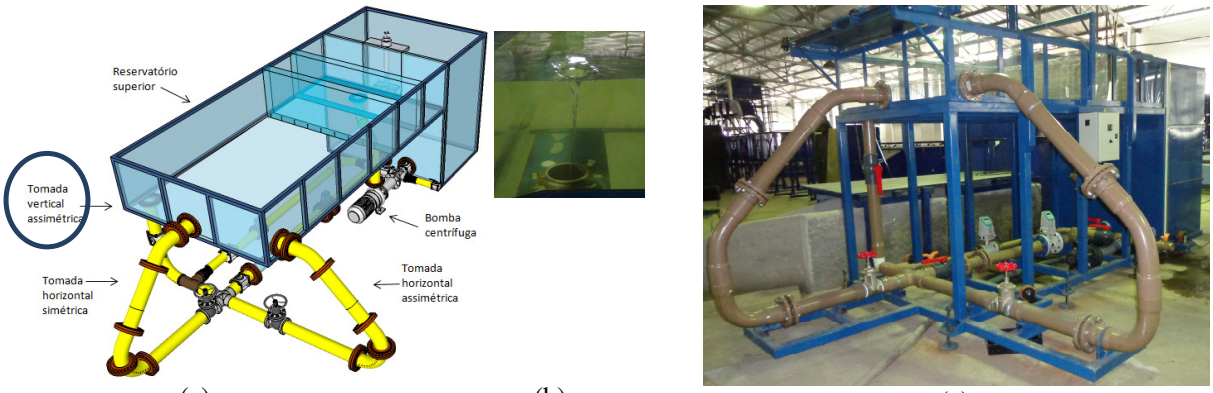


Figura 2: Tipos de captação das tomadas d'água, Tipo Ia - Vertical para baixo, Tipo Ib – Vertical para baixo e saliente (tulipa), Tipo II – vertical para cima, Tipo III - Inclinada para baixo, Tipo IVa – Horizontal, Tipo IVb Horizontal saliente e Tipo V inclinada para cima (sifão) adaptado de Knauss (1987).

Na modelação numérica, os trabalhos para tomadas de água verticais começaram a ser desenvolvidos recentemente podendo-se citar Tokay e Constantinescu (2006), Brito (2010), Nakayama e Hisasue (2010), Chen et. al. (2012) apud Silva (2012), Aybar (2012) e Silva (2012) entre outros. Entretanto, os trabalhos ainda estão em uma fase inicial, não havendo consenso sobre resultados mais importantes.

DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Este trabalho faz parte do P&D denominado "Formação de Vórtices em Tomadas d'água de Usinas Hidrelétricas" onde estão sendo analisadas, através de modelação física e numérica, 2 tipos de tomadas (vertical e horizontal) em 3 modelos físicos, sendo 2 com mesma geometria (modelos MLOH1 e MLOH2), mas em escalas geométricas diferentes (1:2,25) afim de que estes atuem como pequenos protótipos para simulações numéricas e permitam a observação de efeitos de escala. O terceiro modelo (MLAHE) baseado na UHE Serra da Mesa (com escala geométrica de 1:50). Nesse trabalho estão apresentados apenas os resultados referente ao modelo MLOH1, com tomada vertical, implantado no Laboratório de Obras Hidráulicas do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O modelo consiste de uma bomba centrífuga ligada a um circuito fechado que abastece o reservatório superior composto por três tomadas d'água, duas horizontais (uma simétrica e a outra assimétrica) e uma vertical assimétrica, com diâmetros internos (d) de 97,5 mm (Figura 3).



(a) (b) (c)

Figura 3: Modelo físico MLOH1: (a) Esquema, (b) Vórtice tipo 6 na tomada vertical e (c) Modelo experimental.

Os ensaios foram realizados em regime permanente (nível de reservatório e vazão constantes durante o experimento) com aquisição de dados durante 4 minutos após a estabilização, nos quais foram registradas as ocorrências de cada tipo de vórtice e suas respectivas frequencias de ocorrência, bem como situações onde não houve formação de vórtices. As vazões variaram entre 1 e 13 L/s, resultando em números de Froude (Fd) entre 0,14 e 1,70, Reynolds (Re) entre $1{,}29x10^4$ e $61x10^5$, Reynolds radial entre $3{,}40x10^3$ e $2{,}19x10^5$ e Weber (We) entre 24 e 3718.

RESULTADOS PRELIMINARES

Os resultados obtidos no modelo MLOH1, para condição com tomada vertical assimétrica, foram analisados isoladamente. Na Figura 4 se pode observar que existem regiões definidas para a formação de cada tipo de vórtice, todas com uma tendência semelhante, ou seja, a formação de um patamar inicial e outro final nos quais a relação H/D varia pouco com o aumento de Fr e uma zona intermediária onde H/D cresce com Fr. Em decorrência da dificuldade de determinar se há arraste de partículas para dentro da tomada d' água sendo que a tubulação atual do modelo não é transparente, os tipos de vórtice 4 e 5 foram alocados em uma mesma região. Foi constatado que para relações de H/D ≤ 0.25 são formados vórtices do tipo 6, com comportamento semelhante a um vertedouro tulipa. Entretanto, para F_d>1,0, ocorrem vórtices tipo 6 quando a relação H/D ≤ 1,6. Para faixas, 0,3 < F_d < 1,0, o limite para que ocorra vórtices tipo 6 ocorre quando 0,25 < H/D < 1, 6. Os vórtices tipo 3 ocorreram quando F_d ≤ 0,2 e H/D < 1,0, F_d ≥ 1,7 e H/D ≤ 2,2, Para a faixa de 0,2<F_d <1,7, o limite para que ocorra vórtices tipo 3 ocorre quando 1,0 < H/D < 2,2. Não ocorrerão vórtices quando F_d ≤ 0,1 e H/D ≥ 1,70 e F_d ≥ 1,6 e H/D ≥ 3,0. Na faixa 0,1 < F_d < 1,6 a relação H/D varia com F_d entre de 1,7 a 3,0. No entanto, vale ressaltar que esses dados têm caráter preliminar uma vez que a pesquisa continua em andamento e, portanto, serão realizados ensaios adicionais visando confirmar os resultados obtidos.

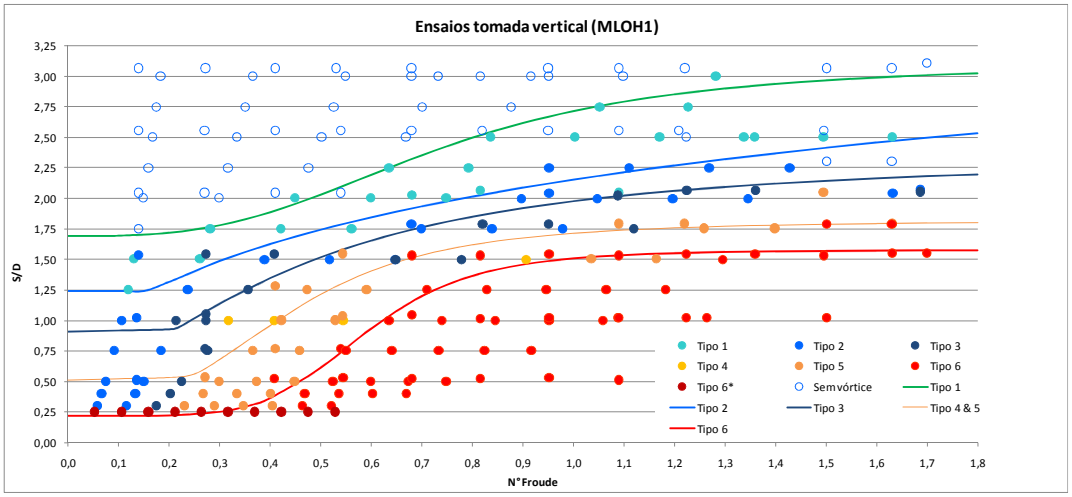


Figura 4: Regiões de ocorrência de vórtice em função da submergência relativa da tomada vertical (H/D) do número de Froude e do tipo de vórtice. Os marcadores vazados indicam situações de vórtice interminetentes, ou seja, variando entre um tipo e outro.

A Figura 5 compara esses resultados com as recomendações de Jain (1978), Knauss (1987) e Ferreira e Genovez (2005), onde se pode observar que as recomendações de Knauss (1987) são próximas à encontrada no presente trabalho para o limite de ocorrência de vórtices tipo 3 para tipo 4. Os valores sugeridos por Jain (1978) são significativamente superiores aos encontrados nesse trabalho, o que pode ser justificado pelo tipo de estrutura ensaiada, com aletas direcionais que favoreciam a ocorrência de vórtices. Os valores encontrados por Ferreira e Genovez (2005), são

condizentes com o presente estudo, uma vez que os mesmos indicam que há possibilidade de vórtices tipo 6 para H/D <0,5 e a não ocorrência de vórtices para H/D >3,0.

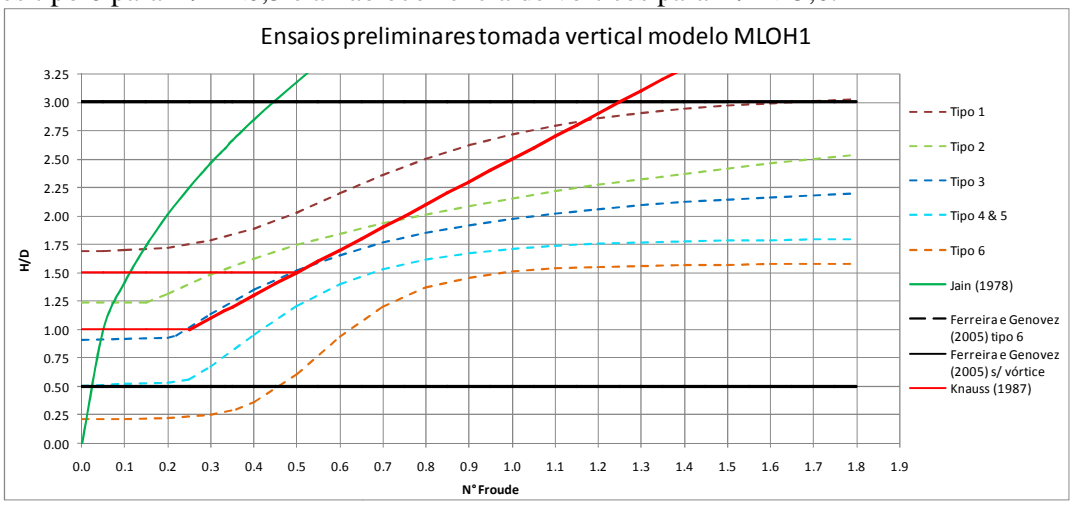


Figura 5: Comparativo entre os resultados obtidos para a tomada vertical e as recomendações de Jain (1978), Knauss (1987) e Ferreira e Genovez (2005).

MODELAGEM NUMÉRICA

As simulações numéricas estão sendo realizadas com emprego do software comercial Ansys CFX. O modelo matemático é bifásico composto pelas equações da conservação da massa e quantidade de movimento para cada uma das fases e pela equação da fração volumétrica. O modelo de turbulência utilizado nestas simulações é o κ-ω. As simulações estão sendo realizadas em regime de escoamento permanente e transiente. O resultado da simulação em regime permanente é utilizado como condição inicial na simulação em regime transiente. O caso apresentado neste artigo possui vazão volumétrica de 8 L/s, Fr ≈ 1,0 e H/D = 1,0. A malha computacional é do tipo hexaédrica com aproximadamente 4,5 milhões de volumes construída pela metodologia multi-bloco empregando o software Ansys ICEM-CFD. Como condição de contorno na entrada do reservatório foi prescrita a vazão volumétrica da água. Na saída do duto foi prescrita uma pressão estática média. Na abertura do tanque foi utilizada a condição de contorno do tipo Opening com pressão igual a zero. Em todas as paredes do modelo foi utilizada a condição de contorno de não-deslizamento. A Figura 6 mostra a geometria do modelo computacional com as respectivas condições de contorno.

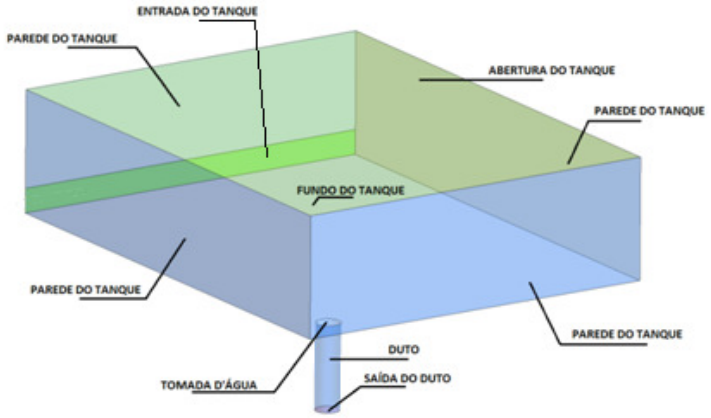
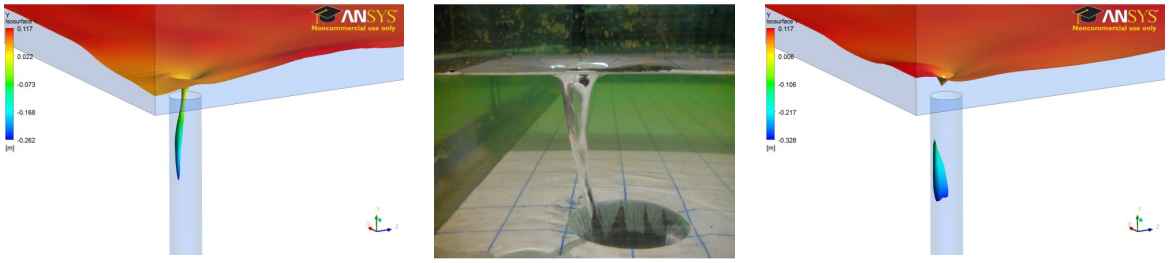


Figura 6: Geometria do Modelo MLOH1 com as condições de contorno.

A Figura 7 mostra resultados preliminares obtidos nas simulações numéricas transientes. Nesta figura é mostrada a interface água-ar para os instantes de tempo equivalentes a 0,3 e 0,6 s.

Pode-se observar na Figura 7, no instante 0,3 s, um vórtice formado com cone de ar entrando na tomada d'água, enquanto no instante 0,6 s o vórtice diminui, o cone de ar desaparece, mas um bolsão de ar permanece dentro do duto e é levado pelo escoamento caracterizando o início de um vórtice tipo 6.



0,3 s Vórtice tipo 6 0,6 s

Figura 7: Resultados preliminares da simulação numérica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O processo de formação de vórtices em tomadas d'água verticais é complexo e depende de inúmeros fatores, e não há uniformidade em resultados anteriormente publicados. Uma vez que os tipos de vórtices considerados para a definição das submergências, por cada autor, não foram os mesmos, então a definição destes critérios esbarra na dificuldade em estabelecer um critério único para evitar a formação de vórtices que considere de forma adequada, todas as variáveis que originam este problema (correntes de aproximação simétrica ou assimétrica; geometria da superfície no entorno da tomada; submersão inadequada; velocidades de aproximação; alterações bruscas na direção do escoamento; obstruções; influência de fenômenos atmosféricos – ventos). A associação de modelos reduzidos com modelos numéricos mostra-se uma ferramenta capaz de autuar no sentido de resolver estas dificuldades, procurando extrair de cada procedimento suas melhores qualidades na tentativa de determinar as verdadeiras condições de formação de vórtices e tipos que podem ocorrer. Entretanto, os modelos numéricos devem ser aferidos e validados pelos modelos físicos para sua correta simulação e interpretação dos resultados. Os resultados apresentados até o presente momento estão mostrando uma perspectiva promissora. Em continuidade a este estudo serão efetuadas comparações entre os resultados dos 3 modelos físicos. Para a transposição desses resultados em escala de protótipo serão utilizados os critérios de semelhança de Froude, Reynolds e Weber (não simultâneos) de maneira a definir os parâmetros para que efeito de escala sejam negligenciáveis.

AGRADECIMENTOS

À toda equipe de Furnas Centrais Elétricas S.A. às equipes do Laboratório de Hidráulica Experimental e Recursos Hídricos (LAHE) e do Laboratório de Obras Hidráulicas do IPH/UFRGS em especial Maximiliano Paschoaloti Messa e Roberta Motta.

REFERÊNCIAS

a) BLAISDELL, F. (1989). Discussion of weak vortices at vertical intakes by John S. Gulliver and Alan J. Rindels (v. 113, n.9, sept. 1987). Journal of Hydraulic Engineering v.115, n.5, p.703-706.

b) BRITO, M. G. (2010). Simulação numérica de tomadas de água. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal.

c) FERREIRA, L. M. C.; GENOVEZ, A. I. B. (2001). Critérios de semelhança na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. In Anais em CDROM do 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.

d) FERREIRA, L. M. C.; GENOVEZ, A. I. B. (2005). Submergência mínima em tomadas d'água verticais. Ingeniería Del Agua vol. 12 nº 2 junio 2005 pg. 107 -115.

e) FERREIRA, L. M. C; BORIN, D.; GENOVEZ, A. I. B., (2000). Submergência crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. In Anais XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II. Córdoba, 22 al 27 oct, p. 673-680.

f) 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, pp. 24 – 28.

g) HECKER, G.E. (1981). Model-prototype comparison of free surface vortices. Journal of the Hydraulics Division, ASCE 107(HY10):1243-1259.

h) JAIN, A. K.; RAJU, K. G. R. (1978). Vortex formation at vertical pipe intakes. Journal of Hydraulic Division vol. 104, n 10, pp. 1429 – 1445.

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

j) NAKAYAMA. A. E HISASUE. N. (2010). Large Eddy Simulation of Vortex Flow in Intake Channel of Hydropower Facility. Jounal of Hydraulic Research vol 48, n. 4, 415-427.

k) PADMANABHAN, M.; HECKER, G. E. (1983). Scale effects in pump sump models. ASCE. Journal of Hydraulic Engineering 110, HY11.

l) SILVA, S. P. V. da (2012). Estudo numérico-experimental da tomada de água da barragem de Foz Tua. Dissertação de Mestrado, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

m) TOKAY. T. E. E CONSTANTINESCU S. G. (2006). Validation of a Large-Eddy Simulation Model to Simulate Flow a Pump Intakes of Realistic Geometry. Journal of Hydraulic Engineering vol 132 No. 12 1303 - 1315.

n) WERTH, D.; FRIZZELL, C. (2009). Minimum pump submergence to prevent surface vortex formation. Journal of Hydraulic Research vol 47, n.1, 141 - 144.