

SUBMERGÊNCIA MÍNIMA EM TOMADAS D'ÁGUA VERTICAIS

Laura Maria Canno Ferreira e Ana Inés Borri Genovez

Resumo:

No projeto de tomadas d'água, os engenheiros hidráulicos deparam-se com uma grande dificuldade que é a prevenção de formação de vórtices. A presença de escoamento com vorticidade pode trazer conseqüências prejudiciais, tais como diminuição do rendimento de máquinas hidráulicas e coeficientes de descarga na tomada, junto ao aparecimento de vibrações. No fenômeno de formação de vórtices influi a submergência, que depende do diâmetro utilizado na tomada d'água, do ângulo de aproximação do escoamento, das dimensões de estruturas que possam estar próximas à tomada e do valor dos números de Froude, Reynolds e Weber. Este trabalho tem como objetivo o estudo da submergência mínima em tomadas d'água verticais. Um estudo experimental foi conduzido, empregando tomadas d'água verticais, variando-se a altura da tomada, a submergência e a vazão. Foram propostas curvas, delimitando regiões onde há a formação dos diferentes tipos de vórtices. Através dos ensaios concluiu-se que a relação mínima entre a submergência e o diâmetro da tomada para que não se formem vórtices é de S/D igual a 3,0. Para relações S/D menores que 0,5 e números de Froude maiores que 1,0, aparecem vórtices com arraste de ar.

Palabras clave: Vórtices, tomadas verticais, estudo experimental.

INTRODUÇÃO

A tomada d'água é um elemento de uma obra hidráulica cuja finalidade é convergir o fluxo proveniente de rios, reservatórios, canais ou poços de sucção para o interior de condutos de descarga ou condutos adutores que alimentam máquinas hidráulicas, tais como turbinas e bombas. No projeto de tomadas d'água, os engenheiros hidráulicos se deparam com uma grande dificuldade que é a prevenção de formação de vórtices. A presença de escoamento com vorticidade pode trazer conseqüências prejudiciais ao desempenho de máquinas hidráulicas. Em instalações hidroelétricas, a geração de energia pode ser reduzida significativamente devido à presença de vórtices, através da superposição de três efeitos: perda de carga ao longo do conduto de adução, redução do coeficiente de descarga da tomada e queda do rendimento da turbina. Através de estudo experimental, Ferreira e Genovez (2001) mostraram que, quando aparecem vórtices com arraste de ar, ocorre uma redução de 50% na vazão líquida que seria descarregada através da tomada, o

que provocou uma perda da eficiência da turbina de 70%. Para a mesma condição, a redução no valor da potência foi de aproximadamente 50%. Além disto, elementos da tomada d'água tais como comportas e outros equipamentos de controle podem estar sujeitos a vibrações.

Desta forma, os fatores que influem na formação de vórtices devem ser estudados e conhecidos para que possam ser tomadas providências, orientadas à prevenção dos mesmos. Geralmente a predição de vórtices se fundamenta em critérios e/ou orientações de estudos teóricos ou experimentais. Deve-se salientar também que os estudos, principalmente em tomadas d'água são, via de regra, casos particulares, pois neles estão presentes fatores que variam para cada caso, tais como tipo de escoamento ou condições de aproximação à tomada e finalidade da obra. O estudo em modelo deve ser cuidadoso, devido à impossibilidade de redução das forças de viscosidade e tensão superficial, lembrando que a influência dessas forças ocasiona o chamado efeito de escala.

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, Cx. Postal 6021, CEP 13083-852, Campinas, SP, Brasil, FAX 55(19)3788-2411, Bolsista de Mestrado. E-mail: lmcf@terra.com.br, bgenovez@fec.unicamp.br

Artículo recibido el 1 de marzo de 2004, recibido en forma revisada el 30 de marzo de 2005 y aceptado para su publicación el 25 de abril de 2005. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

O objetivo deste trabalho é avaliar, através de um estudo experimental, a submergência crítica no fenômeno de formação de vórtices em tomadas d'água verticais.

TRATAMENTO ANALÍTICO

Pode-se definir vórtice como sendo o movimento de um fluido em trajetórias circulares concêntricas, que ocorre como resultado da conservação de um momento angular em um conduto.

Associado a este movimento circular de um elemento fluido tem-se duas grandezas: a vorticidade e a circulação. A vorticidade é uma grandeza vetorial e, fisicamente representa a tendência de um elemento fluido de girar em torno de seu eixo. A circulação é definida como a integral de linha da componente tangencial da velocidade sobre uma curva fechada no fluxo, assim:

$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{S} \tag{1}$$

na qual:

- Γ = circulação (m²/s)
- \vec{V} = vetor velocidade (m/s);
- $d\vec{S}$ = vetor elementar de comprimento (m).

Segundo Cuomo (1981), o movimento giratório ao redor de um eixo vertical provocado pelo escoamento através de um orifício situado no fundo de um reservatório é normalmente associado ao de um vórtice livre. Neste caso, o momento angular é constante e a distribuição de velocidades tangencial é dada por:

$$V = C/r \tag{2}$$

sendo r, o raio da trajetória.

Essa hipótese fica fisicamente não aceitável quando r tende a zero, porque a velocidade tende ao infinito. Assim, próximo ao eixo de rotação a distribuição de velocidades será do tipo rotacional ($V = \omega r$, em que ω é a velocidade angular), sendo o vórtice, neste caso, um vórtice forçado.

É comum chamar de circulação do vórtice, o parâmetro:

$$\Gamma = 2\pi rV \tag{3}$$

As forças atuantes em uma partícula fluida são as forças de pressão e as forças gravitacionais,

já que neste caso, as forças tangenciais são desprezadas. Isolando um paralelepípedo elementar de fluido, de arestas dx, dy e dz, como mostra a Figura 1, a força gravitacional é dada por:

$$F = \rho \text{ Vol } g \tag{4}$$

Por unidade de volume tem-se:

$$\vec{f}_p = -\rho \vec{g} \vec{k} \tag{5}$$

sendo:

\vec{f}_p = resultante das forças de pressão por unidade de volume;

\vec{k} = vetor unitário na direção z.

A força de pressão atuante na direção do eixo x é:

$$\sum Fp_x = p dydz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dydz \tag{6}$$

$$\sum Fp_x = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \tag{7}$$

sendo dx dy dz = dVol. A resultante das forças de pressão na direção x por unidade de volume fica:

$$f_{px} = -\frac{\partial p}{\partial x} \tag{8}$$

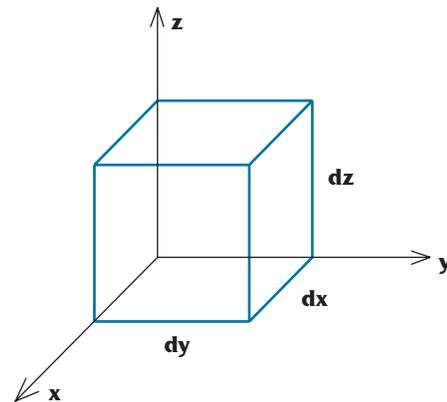


Figura 1. Paralelepípedo elementar de fluido, segundo Pimenta (1981).

De modo análogo, para as direções y e z, tem-se:

$$f_{py} = -\frac{\partial p}{\partial y} \tag{9}$$

$$f_{pz} = -\frac{\partial p}{\partial z} \tag{10}$$

Portanto, a resultante das forças de pressão é expressa por:

$$\vec{f}_p = f_{px} \vec{i} + f_{py} \vec{j} + f_{pz} \vec{k} \quad (11)$$

$$\vec{f}_p = -\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \quad (12)$$

$$\vec{f}_p = -\nabla p \quad (13)$$

Considerando a equação 13, a resultante das forças atuantes no paralelepípedo elementar é:

$$-\nabla p - \rho g \vec{k} = \rho \vec{a} \quad (14)$$

sendo a , a aceleração do fluido.

Segundo Pimenta (1981), no caso de um movimento de rotação em torno do eixo vertical, as forças componentes gravitacionais e de pressão são:

$$-\frac{\partial p}{\partial r} - \rho \omega^2 r = 0 \quad (15)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (16)$$

Disto decorre:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial r} dr + \frac{\partial p}{\partial z} dz = \rho \omega^2 r dr - \rho g dz \quad (17)$$

Para manter o líquido em equilíbrio, é necessário o aparecimento de uma força de direção contrária a esta resultante devido à inexistência das forças tangenciais, inclinando assim a superfície do líquido. Como essa inclinação varia para cada raio, forma-se, então, uma superfície parabólica.

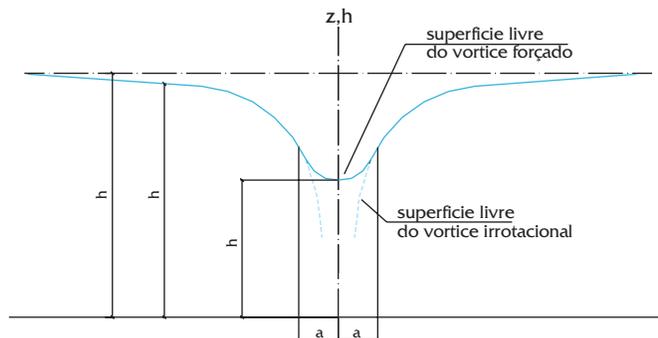


Figura 2. Vórtice combinado de Rankine, segundo Casamassa Neto, (1991).

Essa combinação de vórtice livre com forçado denomina-se vórtice de Rankine, mostrado na Figura 2, que representa razoavelmente o movimento da maioria dos vórtices naturais. O diagrama de distribuição de velocidades, neste caso, é uma combinação de ambos os diagramas e está representado na Figura 3.

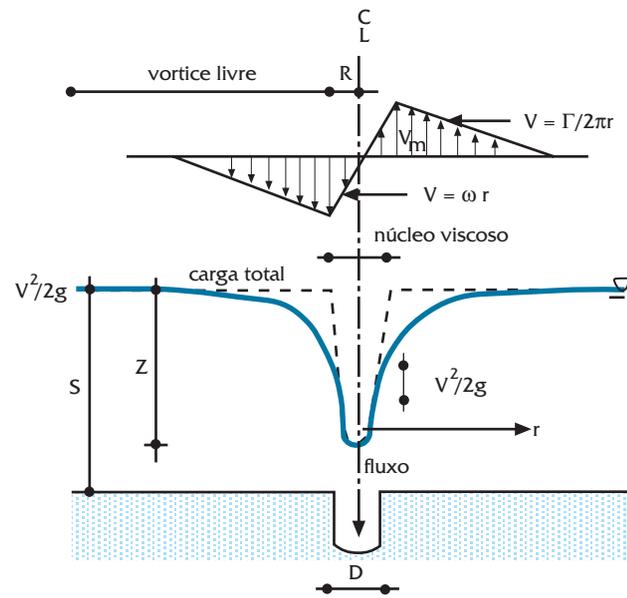


Figura 3. Variação da velocidade tangencial com r , segundo Durgin e Hecker, 1978, citados por Aoki (1982).

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para esclarecer as condições de semelhança na construção de um modelo no processo de ocorrência de vórtices foram feitos diversos trabalhos, mas, até hoje, encontra-se dificuldade para se estabelecer os efeitos da viscosidade, tensão superficial e as velocidades que devem ser usadas no modelo. Entre os principais trabalhos com tomadas d'água verticais pode-se citar o de Anwar (1966). O autor investigou através de estudo teórico e experimental, a formação de vórtices de pequena intensidade num tanque com orifício no fundo, concluindo que a formação de vórtices fracos não depende do número de Reynolds radial (Q/vS), desde que este seja maior que 2×10^3 .

Daggett e Keulegan (1974) fizeram um estudo para verificar a influência dos números de Reynolds (VD/v) e Weber ($\rho DV^2/\sigma$) na formação de vórtices. Para isso, provocaram a formação de vórtices em dois tanques cilíndricos com dimensões diferentes, usando várias misturas água-glicerina e óleos de várias graduações para obter diferentes valores de viscosidade e tensão superficial. Concluíram que para Reynolds maior que 5×10^4 o coeficiente de descarga é somente função da circulação e que, à medida que este diminui, ou seja, aumentam os efeitos viscosos, o coeficiente de descarga torna-se uma função somente de Reynolds. Concluíram também que a tensão superficial não afetava a formação de vórtices.

Através da análise dimensional, Anwar, 1978, citado por Padmanabhan e Hecker (1983), estabeleceu que os parâmetros adimensionais importantes na formação de vórtices são respectivamente: adimensional da submersão (S/D), número de Froude (V/\sqrt{gD}), número de Reynolds (VD/ν), número de Weber ($\rho DV^2/\sigma$) e número de Reynolds radial ($Q/\nu S$). Em que: S é a submersão da tomada (m), V a velocidade de aproximação do fluido no interior da tomada ($V=Q/A$, sendo A a área da seção transversal da tomada) (m/s), D o diâmetro da tomada (m), g a aceleração da gravidade (m/s²), ν a viscosidade cinemática do fluido (m²/s), ρ a massa específica do fluido (kg/m³) e σ a tensão superficial do fluido (kg/s²).

Para estudar as condições de semelhança em tomadas horizontais, Anwar, Weller e Amphlet (1978) realizaram estudo experimental em um canal com tomada horizontal, concluindo que para valores de Reynolds radial maiores que 3×10^4 e Weber elevado pode-se desprezar os efeitos da tensão superficial.

Para estudar os efeitos gravitacionais e da tensão superficial da água e estabelecer um critério que pudesse predeterminar a submersão crítica, Jain e Raju (1978) desenvolveram um estudo em modelo, em dois tanques circulares (com tomada vertical), para que todas as variáveis como diâmetro da tomada, submersão, vazão da tomada, circulação, viscosidade do líquido e tensão superficial do líquido fossem variados. Os autores definem submersão crítica como sendo a submersão a partir da qual o vórtice formado começa a arrastar ar. Concluíram que para Weber maior que 120 os efeitos da tensão superficial na submersão crítica são desprezíveis.

No que se refere às velocidades, Sharp (1981), estabelece que as velocidades dos modelos baseadas na escala de Froude são pequenas para dar condições de comparação entre modelo e protótipo; o uso da escala de Froude garante a similaridade dos efeitos gravitacionais, porém, para compensar os erros viscosos devido à escala, o modelo deve ser operado inicialmente com as velocidades de Froude para estabelecer as características do fluxo. Se houver alguma evidência da formação de vórtice, as velocidades deveriam ser aumentadas. Porém, este procedimento pode distorcer o fluxo, sendo necessários alguns cuidados básicos.

Aoki (1982) faz uma pesquisa bibliográfica sobre vórtices em tomadas d'água concluindo que o fenômeno não está completamente elucidado, destacando alguns estudos com conclusões contraditórias e sem a determinação da submersão crítica.

Padmanabhan e Hecker (1983), estudaram o processo de formação de vórtices em poços de sucção e propuseram uma classificação dos vórtices de acordo com a intensidade. Os vórtices variaram de tipo 1, vórtice fraco, a vórtice tipo 6, intenso com núcleo de ar. Na Tabela 1 apresenta-se a descrição dos tipos de vórtice.

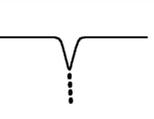
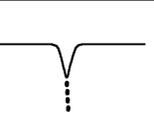
Segundo Gulliver, Rindels e Lindblom (1986), um dos principais problemas no projeto de tomadas d'água é a submersão necessária para se evitar a formação de vórtices. Em suas pesquisas com tomadas existentes (protótipos) e estudos em modelos, a submersão depende do diâmetro da tomada, do ângulo de aproximação do fluxo, das dimensões da estrutura próxima à tomada e do número de Froude da tomada. Através de um gráfico de S/D em função de Froude, definiram uma região (F maiores que 0,5 e S/D menores que 0,7) em que a ocorrência de vórtice para tomadas horizontais é menos provável. Existem neste gráfico alguns pontos referentes a tomadas verticais, porém, não há no trabalho referência a este tipo de tomada. Através de um estudo em modelo concluíram que a circulação depende da geometria da tomada e do ângulo de aproximação.

Yildirim e Kocabas (1998) realizaram estudo em modelo para reservatório de água parada, com tomada vertical, com diâmetros variando de 0,036m a 0,085m. Os resultados de S/D em função da velocidade permitiram concluir que a submersão crítica varia com a distância da tomada ao fundo do reservatório. Destaca-se também que os referidos autores não indicam valores de referência dos números de Reynolds e Weber, e, por falta de dados, não foi possível seu cálculo nem a identificação das variáveis para cada configuração ensaiada.

Ferreira, Borin e Genovez (2000) realizaram um estudo em modelo para determinar a submersão crítica em tomadas d'água verticais, utilizando dois diâmetros diferentes para a tomada, com o objetivo de avaliar o efeito de escala. Concluiu-se que a submersão mínima necessária para evitar vórtices com arraste de ar é S/D igual a 0,5, sendo que para valores de S/D maiores que 3,0, não há a formação de vórtices. Além disso,

somente para casos de vórtice sem arraste de ar (tipos 1 a 5 da classificação de Padmanabhan e Hecker, 1983, apresentada na Tabela 1) há uma pequena influência da relação H/D, sendo H a altura da tomada em relação ao fundo do reservatório.

Tabela 1. Descrição dos tipos de vórtice, segundo Padmanabhan e Hecker (1983).

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

Ferreira e Genovez (2001) avaliaram, através de estudo em modelo, as condições de semelhança no fenômeno de formação de vórtices em tomadas d'água verticais. Para resolver o problema de semelhança, os modelos foram operados segundo a semelhança de Froude, observando os limites dos números de Reynolds e Weber, para evitar o efeito das forças viscosas e de tensão superficial. Desta forma, os valores de Reynolds foram maiores que 3×10^4 e de Weber acima de 120 para não haver efeito de escala. No aspecto relativo à formação de vórtice sem arrastamento de ar, as tomadas ensaiadas neste trabalho não apresentaram efeito de escala em relação às forças de viscosidade e tensão superficial. Nos casos em que apareceram vórtices intensos com arrastamento de ar, houve efeito de escala devido aos efeitos de viscosidade.

Faz-se necessário, portanto, observar e estudar em modelo os limites mínimos de submersão para evitar o aparecimento de vórtices com

arraste de ar, visto que estes são prejudiciais ao funcionamento adequado das máquinas hidráulicas, podendo causar vibrações das estruturas, além da redução da vazão a ser bombeada ou da vazão que passará por uma turbina, reduzindo sua potência. É importante também que se verifiquem os limites mínimos dos adimensionais quando forem realizados estudos em modelo reduzido para avaliar o fenômeno da formação de vórtices, visto que valores de adimensionais abaixo destes limites podem causar o chamado efeito de escala, distorcendo os resultados obtidos.

MÉTODO

Para a realização desta pesquisa foi empregado o banco de ensaio existente no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. A representação do reservatório foi realizada com o auxílio de uma estrutura de concreto de 3,40m de lado, colocada a 2,50m de altura. Para poder representar a aproximação da água, entre a parede do reservatório e a tomada d'água existe uma parede tranquilizadora circular de 0,15 m de espessura, conforme Genovez, 1997, citado por Ferreira (2001). Um esquema geral da instalação experimental pode ser visto na Figura 4.

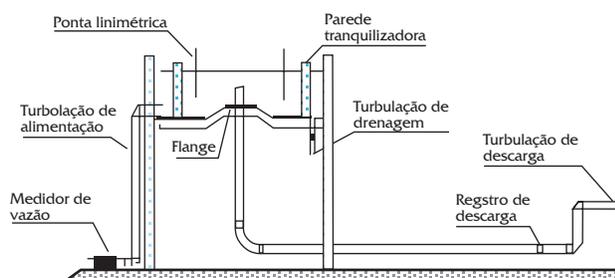


Figura 4. Esquema geral do banco de ensaio, Ferreira (2001).

A medição dos níveis de água dentro do reservatório foi feita por meio de duas pontas limimétricas (0,80 m, precisão de 0,1mm) instaladas diametralmente opostas, visando verificar uma possível desuniformidade na aproximação da água ao modelo. A medição das vazões foi feita com o auxílio de medidor de ultra-som instalado na tubulação de alimentação (system 990 Uniflow que opera na faixa de diâmetro de 0,0635m a 9,144m). Para medir o arraste de ar, no caso de formação de vórtices intensos com arraste de ar, foi usado um mini anemômetro (0,20 m/s a 20,00 m/s; limite de erro de 2%).

O anemômetro foi instalado numa campânula montada em cima da tomada (não está representada no desenho), que descia para permitir a medição do ar arrastado pelo núcleo de ar formado, tomando-se o cuidado de controlar para que a borda inferior da campânula estivesse dentro d'água para assegurar que não houvesse entrada de ar lateralmente, medindo assim toda a vazão de ar arrastada pelo núcleo.

Neste trabalho, foi definida como H , a altura da tomada d'água em relação ao fundo do reservatório, como S , a altura de lâmina d'água acima da crista da tomada e como D , o diâmetro da tomada, conforme apresentado na Figura 5.

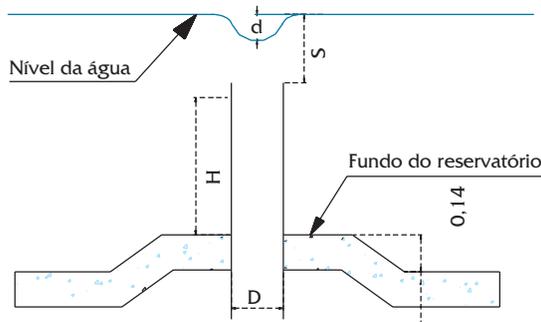


Figura 5. Representação esquemática das variáveis na tomada d'água vertical.

Para a análise do estudo em modelo físico é necessário o emprego de alguns parâmetros adimensionais importantes no processo de formação de vórtices. Desta forma, definindo como d a depressão do nível d'água na tomada (ver Figura 5), o fenômeno de formação de vórtices depende de nove variáveis expressas na equação 18 a seguir:

$$d = f(Q, D, H, S, \rho, \mu, \sigma, g) \quad (18)$$

Com nove variáveis e três dimensões fundamentais, resultarão seis parâmetros adimensionais para representar o fenômeno. A relação funcional entre as variáveis é obtida fazendo a análise dimensional, resultando assim:

$$\frac{d}{S} = f \left[\frac{H}{D}, \frac{S}{D}, \frac{(Q/D^2)}{\sqrt{gD}}, \frac{(Q/D^2) D}{\mu/\rho}, \frac{\rho(Q/D^2)^2 D}{\sigma} \right] \quad (19)$$

sendo $\frac{(Q/D^2)}{\sqrt{gD}}$ o número de Froude, $\frac{(Q/D^2) D}{\mu/\rho}$ o número de Reynolds e $\frac{\rho(Q/D^2)^2 D}{\sigma}$ o número

de Weber. A velocidade do fluxo no interior da tomada é dada por Q/D^2 .

No trabalho foram utilizadas tomadas com diâmetros 0,075m, 0,100m e 0,125m, para poder avaliar o efeito de escala. Para cada diâmetro variou-se a altura da tomada em relação ao fundo e a submergência.

A metodologia de ensaio consistiu em, uma vez fixada a relação escolhida H/D , encher o reservatório até atingir a relação S/D proposta. Estabilizado o nível no reservatório (o ajuste do nível foi feito pelo registro instalado na tubulação de alimentação e pelo registro da tubulação de descarga), observou-se se havia formação de vórtices para a vazão correspondente àquele nível d'água. Se houvesse a formação imediata de vórtice este era identificado e passava-se para a seguinte condição estabelecida. Quando não havia formação imediata de vórtices, a observação era feita durante uma hora, verificando se haveria ou não a formação de vórtices e qual o tipo de vórtice formado. Para cada ensaio foi feita a classificação do tipo de vórtice formado adotando a caracterização de Padmanabhan e Hecker (1983) apresentada na Tabela 1. Desta forma, os vórtices foram classificados desde os pouco intensos ou fracos, tipo 1, caracterizados como rotação superficial sem depressão, a intensos, tipo 6, caracterizados pela presença de núcleo de ar completamente desenvolvido até a tomada. Após esse período, mantendo-se o mesmo nível d'água no reservatório, era manobrado o registro de descarga até atingir uma nova vazão e prosseguia-se o roteiro de ensaios já definido. Para cada relação S/D foram feitas medições com a vazão máxima e mínima e duas vazões intermediárias. Os ensaios foram feitos para relações H/D e S/D variando entre 0,5 e 3,0. Através da metodologia apresentada, foram feitos os ensaios das três tomadas d'água.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 tem-se a indicação das vazões mínimas e máximas para cada tomada ensaiada, junto com os valores dos números de Froude, Reynolds e Weber.

Para avaliar a frequência de formação dos vórtices que apareceram nas tomadas para diferentes condições de descarga e submergência, foi feito um gráfico do tipo de vórtice formado em função da frequência, como se mostra na Figura 6. Observa-se que o diâmetro da tomada tem pouca influência no tipo de vórtice formado, pois as tendências observadas nas três tomadas são bastante semelhantes. Pode-se constatar que em 50% do tempo apareceram vórtices do tipo 2.

SUBMERGÊNCIA MÍNIMA EM TOMADAS D'ÁGUA VERTICAIS

Tabela 2. Intervalos de valores dos adimensionais e da vazão para as tomadas ensaiadas

Valores dos parâmetros	D = 0,075m	D = 0,100m	D = 0,125m
Froude	0,13 - 3,85	0,37 - 2,97	0,52 - 6,39
Reynolds	$3,02 \times 10^4$ - $2,75 \times 10^5$	$4,10 \times 10^4$ - $3,27 \times 10^5$	$7,50 \times 10^4$ - $7,87 \times 10^5$
Weber	138 - 11449	191 - 12091	585 - 70049
Q (l/s)	1,60 - 14,60	3,0 - 22,0	5,0 - 55

A relação S/D é um dos fatores que mais influem na formação de vórtice; assim, foram feitos gráficos desta relação em função dos outros parâmetros que interferem no processo.

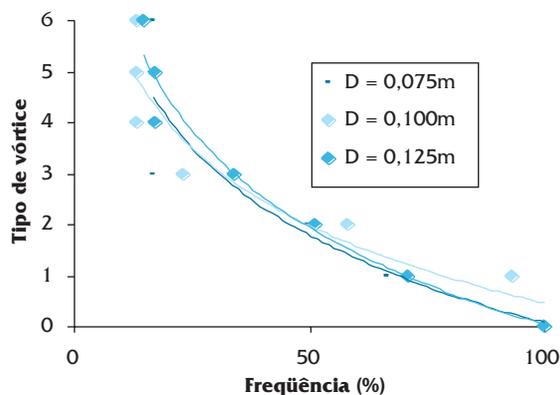


Figura 6. Gráfico do tipo de vórtice em função da frequência.

Na Figura 7 mostra-se um gráfico com a relação S/D em função do número de Froude. Nota-se a presença de vórtices tipo 6 para pequenas relações S/D e Froude na tomada maior que 1,0. No mesmo gráfico são colocados os valores apresentados Gulliver, Rindels e Lindblom (1986) para tomadas verticais. Segundo estes autores, para números de Froude menores do que 0,5 e S/D maiores do que 0,7 a formação de vórtices é menos provável. Pode-se perceber que praticamente todos os pontos, com apenas duas exceções, estão na região onde os vórtices são previstos. Porém, vale ressaltar que os autores apresentaram a relação S/D em função de F para tomadas horizontais de instalações existentes em usinas hidrelétricas (protótipos). Apesar de existirem alguns pontos do gráfico para tomadas verticais, não foi feita nenhuma análise para este tipo de tomada. Além disso, no trabalho, não há referência ao tipo de vórtice de acordo com a intensidade, apenas são definidas tomadas com ou sem problema de vórtices. De acordo com a observação do mesmo gráfico, pode-se dizer que para não haver formação de vórtices com arrastamento de ar, a relação S/D deveria ser maior que 0,5 para tomadas verticais.

Para não haver formação de vórtices, a relação S/D deveria ser maior que 3,0.

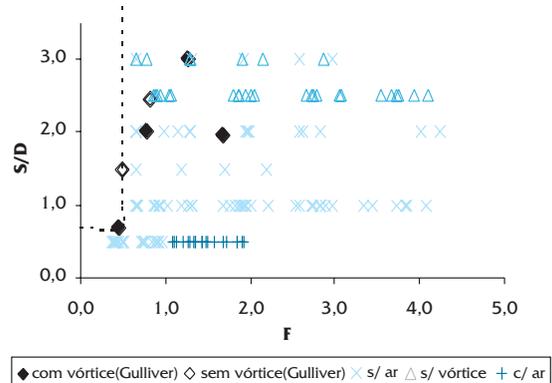


Figura 7. Gráfico comparativo de S/D em função do número de Froude, para tomadas verticais.

No gráfico da Figura 8 estão apresentados os valores da relação S/D em função da velocidade na tomada, V. No mesmo gráfico foi colocada a curva experimental de Denny e Young, 1957, citados por Aoki (1982) para tomadas em poços de sucção. A região abaixo da curva indica tomada com formação de vórtices. Observa-se que a curva de Denny - Young é muito próxima da curva referente aos vórtices do tipo 2 obtidos para as tomadas verticais. Pode ser constatado que muitos pontos representando tomadas com formação de vórtice se localizaram na região onde os vórtices não são previstos de acordo com Denny e Young. Entretanto, esses autores não especificaram que tipo de vórtice foi tomado como referência para se definir a região limite entre formação ou não de vórtices; além disso, os ensaios foram feitos pelos autores para tomadas de poços de sucção, que tem, portanto, características diferentes das tomadas ensaiadas neste trabalho.

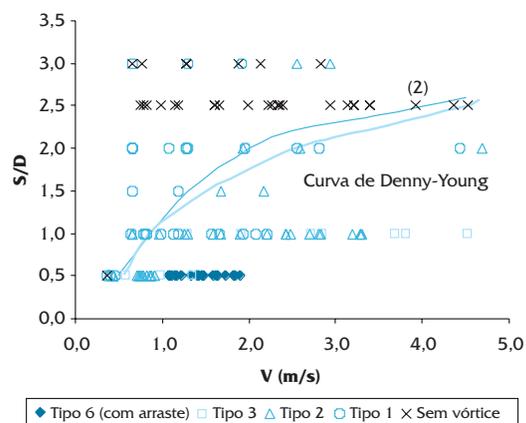


Figura 8. Gráfico de S/D em função da velocidade na tomada para os diferentes tipos de vórtices.

No gráfico da Figura 9 foi representada a relação S/D em função do número de Froude na tomada, considerando os diferentes tipos de vórtices formados. Neste gráfico, foram propostas curvas, delimitando as regiões onde cada tipo de vórtice é formado, em função do número de Froude da tomada. As curvas de 1 a 4 da Figura 9 delimitam regiões onde há formação de vórtices intensos com arraste de ar tipo 6, vórtices do tipo 3, 2 e uma região sem formação de vórtices. As equações de (20) a (23) representam cada curva.

- Curva 1: $S/D = -0,0744F^2 + 0,589F + 1,901$ sem vórtice (20)
- Curva 2: $S/D = -0,147F^2 + 1,102F + 0,401$ tipo 2 (21)
- Curva 3: $S/D = -0,0718F^2 + 0,497F + 0,348$ tipo 3 (22)
- Curva 4: $S/D = -0,100F^2 + 0,350F + 0,350$ tipo 6 (com arraste) (23)

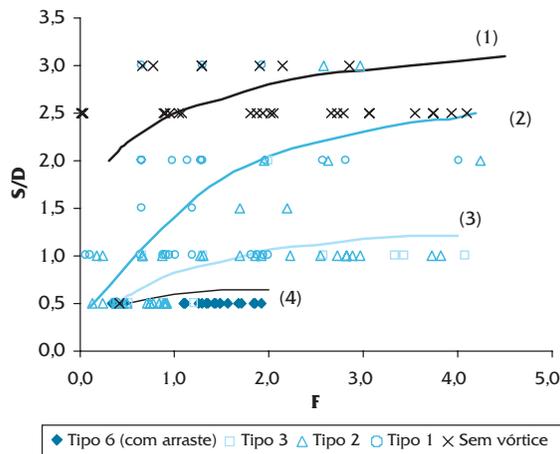


Figura 9. Gráfico de S/D em função do número de Froude na tomada

CONCLUSÕES

Existe uma diferença grande entre os trabalhos sobre formação de vórtices no que diz respeito ao tipo de tomada analisada e ao tipo de vórtice estudado. Muitas vezes não há uma classificação do tipo de vórtice e não se consegue definir se o vórtice considerado é com arraste de ar, ou se as pequenas depressões também foram levadas em consideração. Um outro problema é a definição de submergência, podendo esta ser considerada como altura de água acima da crista da tomada ou a altura total de água, desde o fundo do reservatório.

Neste trabalho, foram considerados desde vórtices intensos, com arraste de ar, até vórtices mais fracos com ligeira depressão da superfície, formados em tomadas d'água verticais. Foi definida como submergência crítica a altura de água,

acima da crista da tomada, abaixo da qual ocorre formação de vórtices com arraste de ar. Os ensaios foram realizados dentro dos limites mínimos dos adimensionais envolvidos no fenômeno para evitar efeito de escala.

Através dos ensaios concluiu-se que a relação mínima entre a submergência e o diâmetro da tomada para que não se formem vórtices é de S/D igual a 3,0. Para relações S/D menores que 0,5 e números de Froude maiores que 1,0, aparecem vórtices com arraste de ar.

As conclusões obtidas neste trabalho são válidas dentro do intervalo de medição e para os casos de tomadas verticais com aproximação simétrica, sem influência de estruturas próximas.

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{a}	aceleração do fluido (LT^2)
$d\vec{S}$	vetor elementar de comprimento
dx, dy e dz	arestas de um paralelepípedo elementar
D	diâmetro da tomada (L)
\vec{f}_p	resultante das forças de pressão por unidade de volume (F)
$F = V/(gD)^{1/2}$	número de Froude
g	aceleração da gravidade (LT^2)
\vec{i}	vetor unitário na direção x
\vec{j}	vetor unitário na direção y
\vec{k}	vetor unitário na direção z
p	pressão em um ponto ($ML^{-1}T^{-2}$)
Q	vazão na tomada (L^3T^{-1})
r	raio do núcleo de ar (L)
$Rey = VD/\nu$	número de Reynolds
$Rey_r = Q/\nu S$	número de Reynolds radial
S	submergência da tomada (L)
V	velocidade na tomada (LT^{-1}), velocidade em um ponto (LT^{-1})
\vec{V}	vetor velocidade
$W = \rho V^2 D / \sigma$	número de Weber
$\Gamma = \vec{V}_\theta r$	circulação (L^2T^{-1})
ν	viscosidade cinemática do fluido (L^2T^{-1})
ρ	massa específica do fluido (ML^{-3})
σ	tensão superficial do fluido (MT^{-2})
ω	velocidade angular (LT^{-1})

REFERÊNCIAS

ANWAR, H. O., 1966 - Formation of a weak vortex. Journal of Hydraulic Research, vol. 4, n. 1, p. 1-16.
 ANWAR, H. O., WELLER, J. A. and AMPHLETT, M. B., 1978 - Similarity of free-vortex formations at horizontal intake. Journal of Hydraulic Research, Vol. 16, n. 2, p. 95-105.

- AOKI, C. M., 1982 - Condições de semelhança na formação de vórtices em tomadas d'água. Boletim Técnico do DAEE, São Paulo, Vol.5, n.2, p. 129-153.
- CASAMASSA NETO, J., 1991 - Vórtice. Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre. São Paulo.
- CUOMO, A. R., 1981 - Introdução ao estudo da semelhança de vórtices nas embocaduras. Boletim Técnico do DAEE, São Paulo, Vol. 4, n. 2.
- 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.
- FERREIRA, L. M. C., 2001 - Submersão Crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre. Campinas.
- FERREIRA, L. M. C, BORIN, D. e GENOVEZ, A. I. B., 2000 - Submersão Crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. In: XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II. Córdoba, 22 al 27 oct, p. 673-680.
- FERREIRA, L. M. C e GENOVEZ, A. I. B., 2001 - 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 CD-ROM.
- GENOVEZ, A. I. B., 1997 - Determinação do comprimento limite no estudo do arrastamento de ar em poço com embocadura tipo tulipa. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP para obtenção do título de Livre Docente. Campinas.
- 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.
- 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.
- PADMANABHAN, M. e HECKER, G. E., 1983 - Scale effects in pump sump models. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 110, n.11, p.1540-1556.
- PIMENTA, C. F., 1981 - Curso de Hidráulica Geral. Vol.1, 4 ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, Cap. 1: Hidrostática.
- SHARP, J. J., 1981 - Hydraulic Modeling. London: Ed. Butterworths.
- YILDIRIM, N. e KOCABAS, F., 1998 - Critical submergence for intakes in still water reservoir. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, n.1, p. 103-104.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPQ - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de mestrado, e ao assessor pelas observações realizadas que contribuíram para enriquecer o trabalho.

