



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento
Ambiental

**ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE VÓRTICES EM TOMADAS DE
ÁGUA HORIZONTAIS SIMÉTRICAS**

Eng. Wilson Citadin Júnior

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre, janeiro, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS

Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Giulian Marques
Prof. Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres

BANCA EXAMINADORA:

Profa. Dra. Daniela Guzzon Sanagiotto

Prof. Dr. Eder Daniel Teixeira

Prof. Dr. Maurício Dai Prá

Porto Alegre, janeiro, 2016.

“Todos esses que aí estão
Atravancando meu caminho,
Eles passarão...
Eu passarinho!”

Mario Quintana

AGRADECIMENTOS

A minha família, pelo amor e dedicação em todos os momentos.

A Ariadne pelo carinho e incentivo.

Aos Professores Dr. Marcelo Giulian Marques e Dr. Luiz Augusto Magalhães Endres, cuja orientação e incentivo foram fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

A Eletrobras-Furnas que, através do projeto de pesquisa “Formação de Vórtices em Tomadas de Água de Usinas Hidrelétricas”, subsidiou, além do material, a base de dados necessária ao desenvolvimento desta dissertação.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e seu Instituto de Pesquisas Hidráulicas, os quais são responsáveis pelo curso de mestrado e laboratório onde foram realizadas as pesquisas.

Aos colegas de projeto de pesquisa, Eng^a Mariane Kempka e Eng. Leandro Soares, pela colaboração.

Aos estagiários do Laboratório de Obras Hidráulicas, pela colaboração e por toda a dedicação no tratamento de dados.

Aos colegas e amigos, tão importantes que sempre se fizeram presentes.

CONTEÚDO

1 INTRODUÇÃO	12
2 DIRETRIZES DE PESQUISA	15
2.1 Questão da pesquisa	15
2.2 Objetivos da pesquisa	15
2.2.1 Objetivo principal	15
2.2.2 Objetivos secundários	15
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1 Tomadas de água de obras hidráulicas	16
3.1.1 Tipos de tomada de água	17
3.1.2 Classificação das tomadas quanto ao fluxo	19
3.1.3 Classificação das tomadas quanto à aproximação	20
3.1.4 Dimensionamento de tomadas de água	20
3.2 Vórtices	22
3.2.1 Classificação do vórtices	23
3.2.2 Dispositivos antivórtices	25
3.3 Submergência em tomadas de água	25
3.4 Critérios de semelhança	31
3.4.1 Leis de semelhança	31
3.4.2 Efeitos de escala	31
3.4.3 Condições de semelhança encontradas	32
3.5 Análise da revisão bibliográfica	33
4 METODOLOGIA DA PESQUISA	35
5 ANÁLISE DE DADOS	44
5.1 Resultados obtidos nos ensaios para a tomada de água sem reentrância	44
5.2 Resultados obtidos nos ensaios para a tomada de água com reentrância de 0,5 diâmetros	47
5.3 Resultados obtidos nos ensaios para a tomada de água com reentrância de 1,0 diâmetros	50
5.4 Resultados obtidos nos ensaios para a tomada de água com reentrância de 1,5 diâmetros	53
5.5 Comparação dos resultados obtidos para as tomadas de 0d, 0,5d, 1d e 1,5d	56
5.6 Considerações finais	58
6 CONCLUSÕES	59
7 RECOMENDAÇÕES	60

REFERÊNCIAS

61

ANEXO A

63

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenho esquemático com os elementos da tomada de água da UHE Dona Francisca	12
Figura 2 - Esquema de uma tomada de água em uma estação de bombeamento	14
Figura 3 - Tomada de água antes do enchimento do reservatório, UHE Itaipu	16
Figura 4-Representação de um sistema de captação e abastecimento	17
Figura 5 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação vertical de descida	18
Figura 6 – Desenho esquemático de uma tomada de água com captação horizontal	18
Figura 7 – Desenho esquemático de uma tomada de água com captação inclinada de descida	18
Figura 8 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação inclinada de subida	18
Figura 9 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação vertical de subida	19
Figura 10 - Representação esquemática de uma tomada de água de reservatório	19
Figura 11 - Representação esquemática de uma tomada de água de derivação com fluxo frontal	19
Figura 12 - Representação esquemática de uma tomada de água de derivação com fluxo lateral	19
Figura 13 - Representação das linhas de fluxo do fluido convergindo em uma tomada de água com aproximação simétrica	20
Figura 14 - Representação das linhas de fluxo do fluido próximas à tomada de água com aproximação assimétrica	20
Figura 15 - Vórtice desenvolvido desde a superfície, com entrada de ar, em uma tubulação transparente	23
Figura 16 - Classificação dos tipos de vórtices quanto a sua intensidade	24
Figura 17 - Dispositivos antivórtice utilizados junto à tomada de água	25
Figura 18 - Elementos para cálculo da submergência crítica, (S_{cr})	26
Figura 19 - Declividade das curvas apresentadas pela bibliografia para cálculo da S_{cr}	28
Figura 20 - Limites de submergência mínima para tomadas com aproximação simétrica e assimétrica	30
Figura 21 - Estrutura modelo LOH 2, utilizado na pesquisa	34
Figura 22 - Tomadas de água estudadas (a) sem reentrância ($L=0$), (b) reentrância de $0,5 D$ ($L=0,5$), (c) reentrância de $1 D$ ($L=1$) e reentrância de $1,5 D$ ($L=1,5$)	35
Figura 23 - Comparação entre os limites sugeridos pela bibliografia para evitar o efeito de escala e os dados da pesquisa	37
Figura 24 - Tempo de permanência dos vórtices no ensaio ($T_{1,5D_Q2,4_S/D1}$)	38

Figura 25 - Rotação superficial, sem depressão (ensaioT1_Q0,8_S/D1)	40
Figura 26 - Depressão superficial(ensaioT1_Q1,2_S/D1)	40
Figura 27 - Formação de núcleo sem a presença de ar(ensaioT1_Q2,0_S/D1)	41
Figura 28 - Sucção de partículas flutuantes, sem sucção de ar(ensaioT1_Q2,8_S/D1)	41
Figura 29 - Bolhas de ar engolidas pela tomada(ensaioT1_Q3,6_S/D1)	42
Figura 30 - Núcleo desenvolvido da superfície até a tomada(ensaioT1_Q3,6_S/D1)	42
Figura 31 - Regiões definidas para os tipos de vórtice com as respectivas intensidades (a) sem vórtice, (b) vórtices fracos e (c) vórtices fortes	43
Figura 32 - Resultado do ensaio para reentrância 0D	44
Figura 33 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0D	45
Figura 34 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0D comparadas à bibliografia	46
Figura 35 - Resultado do ensaio para reentrância 0,5 D	47
Figura 36 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0,5 D	48
Figura 37 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0,5 D comparadas à bibliografia	49
Figura 38 - Resultado do ensaio para reentrância 1 D	50
Figura 39 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1D	51
Figura 40 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1 D comparadas à bibliografia	52
Figura 41 - Resultado do ensaio para reentrância 1,5 D	53
Figura 42 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1,5D	54
Figura 43 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1,5 D comparadas à bibliografia	55
Figura 44 - Zona de transição para vórtices de intensidade 1	56
Figura 45 - Zona de transição para vórtices de intensidade 2	57
Figura 46 - Zona de transição para vórtices de intensidade 3	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Descrição dos tipos de vórtice segundo Padmanabhan e Hecker	24
Quadro 2 - Fórmulas encontradas na literatura para cálculo da submergência crítica	27
Quadro 3 - Condições de semelhança encontradas na literatura	34
Quadro 4 - Vazões utilizadas na pesquisa em l/s	37
Quadro 5 - Classificação dos vórtices sugerida pelo autor	39

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Região sem vórtices	
b	Região de vórtices fracos ou incipientes	
c	Região de vórtices críticos ou aceitáveis	
d	Região de vórtices fortes ou de bloqueio	
D	Diâmetro do conduto	[L]
C	Constante de circulação	[1]
f	Folga de segurança	[L]
F	Número de Froude	[1]
g	Aceleração da gravidade	[LT ⁻²]
H	Profundidade da tomada	[L]
L	Distância da tomada à parede	[L]
NA	Nível de água	[L]
Q	Vazão	[L ³ T ⁻¹]
ρ	Massa específica do líquido	[Ml ⁻³]
Re	Número de Reynolds	[1]
Re _r	Número de Reynolds radial	[1]
S	Submergência	[L]
Scr	Submergência crítica	[L]
σ	Tensão superficial	[MT ⁻²]
ν	Viscosidade cinemática	[L ² T ⁻¹]
V	Velocidade	[LT ⁻¹]
We	Número de Weber	[1]

LISTA DE SIGLAS

AFNOR	Association Française de Normalisation
ANSI	American National Standard for Pump Intake Design. Hydraulic Institute
ESHA	European Small Hydropower Association
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LOH	Laboratório de Obras Hidráulicas
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UHE	UsinaHidrelétrica

RESUMO

JUNIOR, V. C. **ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE VÓRTICES EM TOMADAS DE ÁGUA HORIZONTAIS SIMÉTRICAS**. 2016. 68 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Tendo em vista que as tomadas d'água são estruturas fundamentais na captação de água e os efeitos causados por vórtices são altamente prejudiciais a estas estruturas, realizou-se uma investigação sobre a influência dos parâmetros físicos no desempenho e conseqüentemente no dimensionamento de tomadas de água. Com a finalidade de compreender o fenômeno de formação de vórtices, foram coletados dados em um modelo experimental genérico montado no Laboratório de Obras Hidráulicas no IPH da UFRGS.

Com a análise dos dados retirados do modelo foi possível identificar a influência de parâmetros físicos como: condições de aproximação do escoamento, vazão, reentrância da tomada (distância da tomada à parede) e níveis de submergência na formação de vórtices. Nos ensaios para aquisição dos dados foram observados a frequência e intensidade dos vórtices formados no modelo físico de uma tomada de água com aproximação simétrica e reservatório de nível constante, variando o número de Froude do escoamento no conduto, o nível de submergência e a reentrância da tomada. Identificados os vórtices, foram propostos limites para as zonas de intensidade, onde definiu-se as faixas de aumento de intensidade dos vórtices, desde vórtices fracos até os vórtices fortes, ou seja, com arraste de ar para o interior da tubulação.

Os resultados indicaram que qualquer alteração nos parâmetros pesquisados como o aumento da vazão de descarga (aumento do número de Froude), o aumento da reentrância da tomada e a redução da submergência são fatores que colaboram para a formação de vórtices com arraste de ar.

ABSTRACT

Considering that intakes are key structures in the uptake of water and the effects caused by vortices are highly prejudicial to these structures, an investigation was conducted about the influence of the physical parameters in the performance and consequently in the design of water intakes. In order to study the vortex formation, data were collected from a generic experimental model located at Laboratório de Obras Hidráulicas - LOH / IPH UFRGS.

The parameters studied were: approaching conditions, discharge, distance from the intake to the reservoir wall and submergence levels. By analyzing the model data, it was possible to identify zones where the intensity of the vortices increase ranges.

The results indicated that any change in these parameters investigated like discharge increase (Froude number increase), distance from outlet increase and submergence reduces are factors that contribute to the formation of vortex with air entrainment.

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural indispensável à vida. A evolução das técnicas de uso deste elemento se desenvolvem desde a antiguidade. Ainda hoje a captação, controle, distribuição e tratamento da água são objetos de estudo de grupos de pesquisa ao redor do mundo.

No cotidiano a água possui diversas utilidades como: consumo humano e animal, uso industrial, na agricultura, navegação, pesca e lazer e geração de energia, dentre outros.

Desde antigamente os barramentos hidráulicos servem para regular o volume de água ao longo da estação de seca, atualmente o projeto de uma barragem tornou-se mais complexo devido à evolução de suas técnicas de projeto e construção.

Entre os elementos indispensáveis de uma obra hidráulica está a tomada de água, estrutura que tem o objetivo de captar a água de canais, lagos, reservatórios e rios para o sistema de adução ou para condutos de descarga, alimentando máquinas hidráulicas como bombas e turbinas. Em usinas hidrelétricas, conduzem a massa fluida até as turbinas, onde é transformada a energia hidráulica em energia mecânica. A figura 1 é um exemplo de tomada de água em uma usina hidrelétrica.

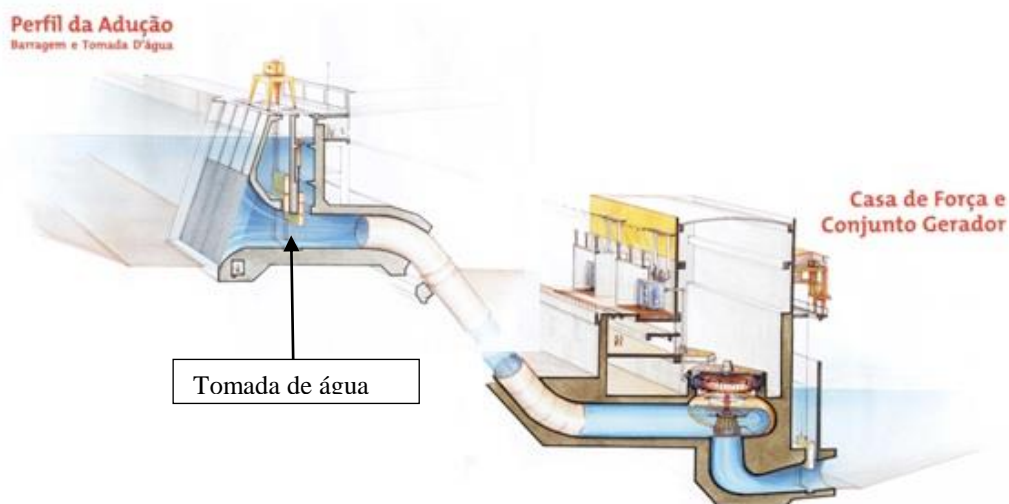


Figura 1–Desenho esquemático com os elementos da tomada de água da UHE Dona Francisca (fonte: DFSA¹)

¹Dona Francisca Energética S.A.

A grande diversidade de condições de contorno envolvidas na operação de tomadas de água existentes (níveis operacionais, correntes de aproximação ou tipo de captação) torna cada obra única, sendo pequena a chance de se encontrarem duas tomadas de água idênticas.

Nas tomadas de água uma das condições fundamentais de operação é a inexistência de ar no sistema de adução devido a formação de vórtices. A entrada de ar pode causar diversos problemas no sistema de adução, conforme Knauss (1987):

- a) diminuição da performance (eficiência) das máquinas hidráulicas;
- b) efeitos de cavitação no conduto forçado;
- c) redução da vazão de entrada na tomada, seja pelo aumento da perda de carga, seja pela presença de ar no escoamento ou pelas medidas operacionais adotadas para minimizar formação dos vórtices;
- d) vibração das turbinas e condutos;
- e) cavitação.

Em aproveitamentos hidráulicos de grandes dimensões, como usinas hidrelétricas, a locação da tomada d'água próxima à superfície livre do reservatório favorece a formação de vórtices com arraste de ar, trazendo consequências desfavoráveis ao projeto ou a operação. Quanto menor a cotado nível da água em relação à tomada, maior a economia na construção de um modo geral, devido a menor quantidade de área alagada. Porém, o nível da água acima da tomada deve ser suficiente para que não ocorram vórtices com entrada de ar, que reduzem a eficiência do sistema de adução. A escolha deste nível influencia nos custos de construção dos reservatórios. Este é o desafio do projetista, encontrar a altura ótima que alie economia e eficiência na construção da obra.

Para evitar a formação desses vórtices pode-se tomar algumas medidas, Vischer² (1976 apud KNAUSS 1987, p.93):

- a) aumentar a submergência, aumentando a profundidade da tomada d'água porém, quanto maior a submergência da tomada, maior o custo de implantação da usina pois aumenta-se a quantidade de área alagada;
- b) diminuir a velocidade média do escoamento no interior da tomada, com o aumento do diâmetro da tubulação. Esta alternativa também provoca aumento no custo da obra,

²VISCHER, D. Hydraulische Untersuchungen für die Abwassertechnik. Tagungsbericht des Verbandes Schweizerischer Abwasserfachleute Bern, No. 131/1, 1976.

devido ao aumento da cota de coroamento da barragem ou à diminuição do volume de armazenamento;

- c) reduzir a assimetria do escoamento;
- d) execução de obras auxiliares, por exemplo, flutuadores de quebra de corrente.

As estações de bombeamento também utilizam tomadas de água, entretanto, a sua vazão e dimensões na maioria dos casos tendem a ser menores se comparadas a uma tomada de água de uma barragem. Os reservatórios de distribuição de água, nestes casos, destinam-se a regularizar as variações entre as vazões de adução e de distribuição e condicionar as pressões na rede de distribuição, Tsutiya (1997). A figura 2 apresenta um esquema de tomada de água em estações de bombeamento. Os níveis nos reservatórios de distribuição além de satisfazer as condições para não entrada de ar na tubulação devem também respeitar condições como o NPSH requerido pela bomba.

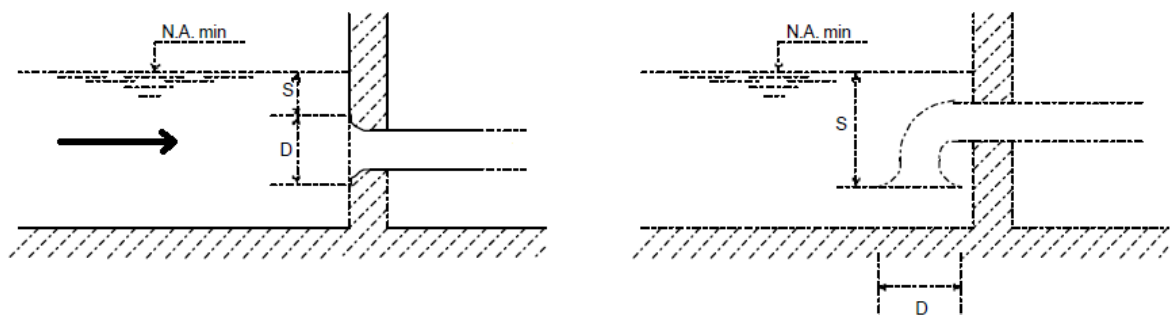


Figura 2 – Esquema de uma tomada de água em uma estação de bombeamento

(fonte: Tsutiya 1997)

O estudo de fenômenos hidráulicos em modelos permite antecipar uma série de características do comportamento da massa de água durante a operação da usina ou da estação de bombeamento ainda na fase de projeto.

No caso de estudos de tomada d'água, a maior dificuldade na modelagem física é simular as condições de escoamento mantendo as mesmas características do fluido, no caso a água. Isso porque, como se utiliza o mesmo líquido nos casos de modelo e protótipo, o efeito da tensão superficial é o mesmo, não sendo reduzido em escala. Neste caso, a ocorrência de vórtices no modelo indica que certamente ocorrerão vórtices no protótipo mas, a não ocorrência de vórtices no modelo não indica que não haverá a formação de vórtices, isso se deve a influência de efeitos viscosos, de tensão superficial e da velocidade do escoamento. Dessa maneira deve-se cuidar o efeito de escala nos estudos em modelo físico e o modelo deve ter certas dimensões para que isto não ocorra, como será visto no item 3.4.2 efeitos de escala.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Para a elaboração da presente pesquisa foram definidas as seguintes diretrizes.

2.1 QUESTÃO DA PESQUISA

A questão que esta pesquisa busca responder é: analisando a influência da variação da vazão, da submergência e da reentrância da tomada, qual o nível de submergência sobre a tomada d'água seguro para operação de máquinas hidráulicas sem a entrada de ar?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos desta pesquisa estão apresentados nos próximos itens.

2.2.1 Objetivo principal

O objetivo desta pesquisa é investigar e compreender o processo de formação de vórtices em tomadas de água de captação horizontal simétrica, através da realização de ensaios em um modelo hidráulico, visando identificar as condições para formação de vórtices com entrada de ar no sistema de adução.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários desta pesquisa são:

- a) comparação de diferentes condições de operação do modelo experimental alterando a reentrância da tomada, a submergência e a vazão, para identificação das condições mais críticas de formação de vórtices;
- b) comparação entre os dados obtidos nos ensaios com o modelo experimental e a bibliografia existente sobre tomadas de água, para delimitação de áreas gráficas onde existe diferença de intensidade na formação de vórtices.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 TOMADAS DE ÁGUA DE OBRAS HIDRÁULICAS

Conforme Ferreira (2001, p1)

A tomada d'água é o 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.

As tomadas de água devem ser um conjunto de estruturas e dispositivos, construídos ou montados junto a um manancial, para a retirada da água destinada ao sistema de abastecimento em quantidade suficiente e com a melhor qualidade possível e ainda facilitar o acesso para a operação e manutenção do sistema de adução.

Em usinas hidrelétricas, as tomadas de água direcionam o escoamento para o conduto forçado, alimentando as turbinas para geração de energia. Devem ser projetadas e construídas para funcionar ininterruptamente em qualquer época do ano. A figura 3 apresenta uma vista de montante das tomadas de água da Usina Hidrelétrica de Itaipu, antes do enchimento do reservatório.

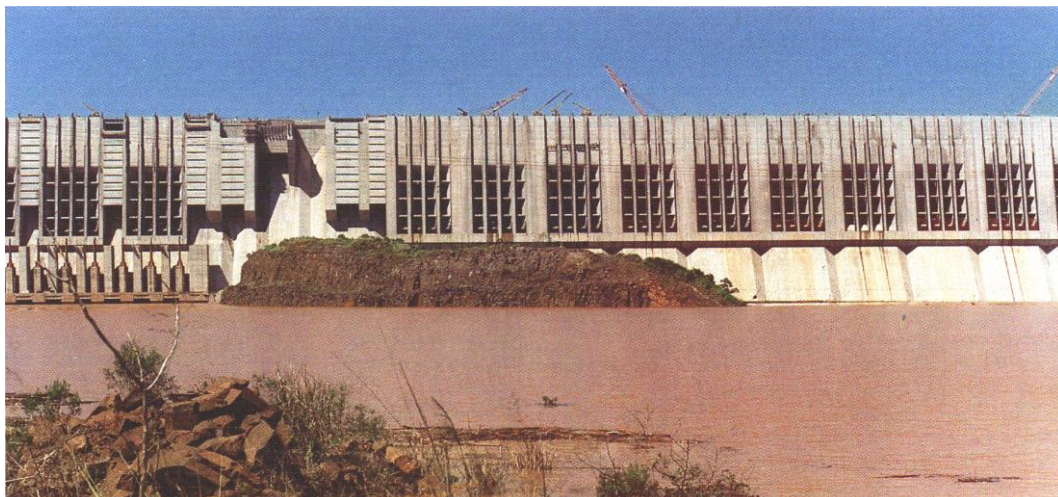


Figura 3 - Tomada de água antes do enchimento do reservatório, UHE Itaipu
(fonte: trabalho não publicado³)

³ Material de aula. Tomadas d'água – parte 1, disciplina obras hidráulicas do curso de engenharia civil. Professor Marcelo Marques do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS

No caso de tomadas de água de sistema de abastecimento de água elas devem ser capazes de aduzir a quantidade de água necessária para garantir o volume de água suficiente à rede de abastecimento. A figura 4 apresenta um exemplo de sistema de captação e distribuição de água.

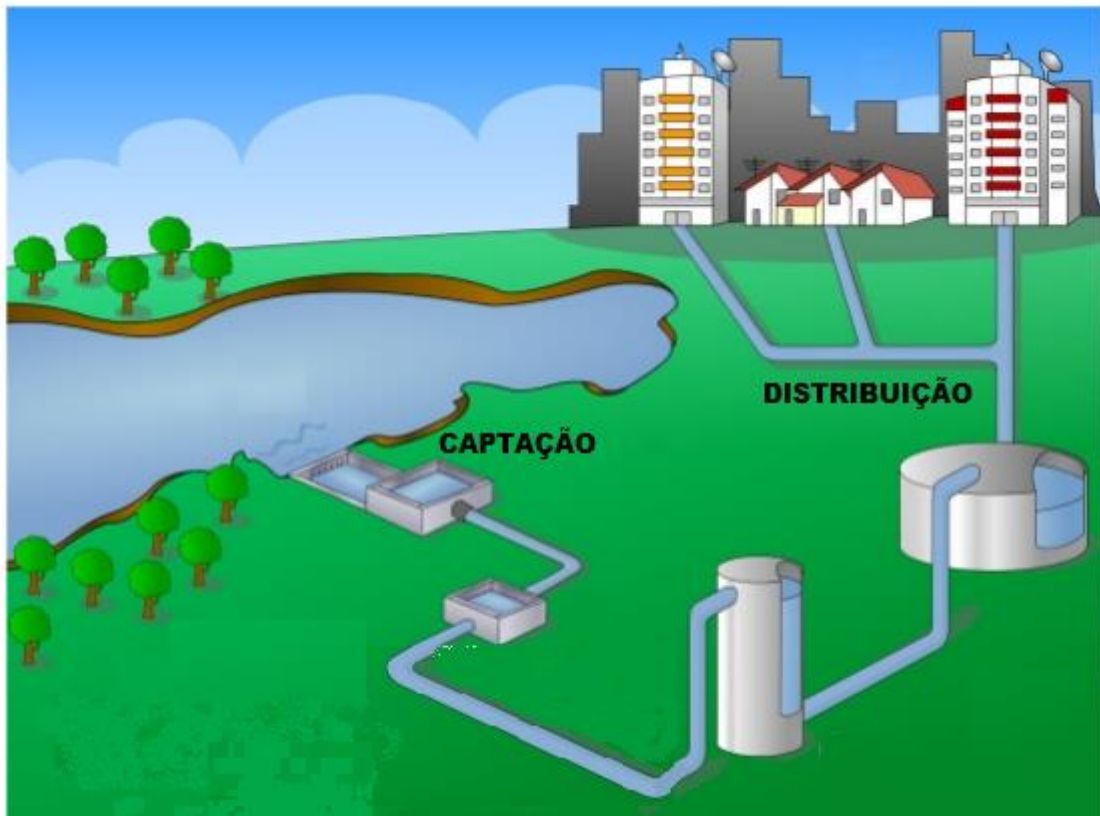


Figura 4 – Representação de um sistema de captação e abastecimento
(fonte: http://site.sabesp.com.br/uploads/file/asabesp_doctos/Tratamento_Agua_Impressao.pdf acesso em 17/02/2015)

Em nenhum dos casos é aceitável a entrada de arno interior da tubulação, para evitar problemas e danos ao sistema, que vão desde aumento da perda de carga e redução da vazão, a problemas específicos dependendo da finalidade da tomada.

3.1.1 Tipos de tomada de água

As tomadas de água podem ter diferentes disposições para convergir o fluxo da água e, dependendo da sua posição de captação, há influência na formação dos vórtices. Segundo Knaus (1987) as tomadas podem ser do tipo:

- a) tomada de água de captação vertical de descida, (figura 5);

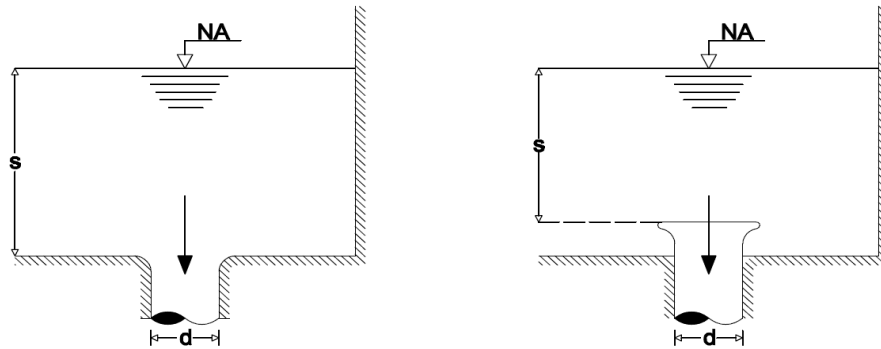


Figura 5 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação vertical de descida

- b) tomada de água de captação horizontal, (figura 6);

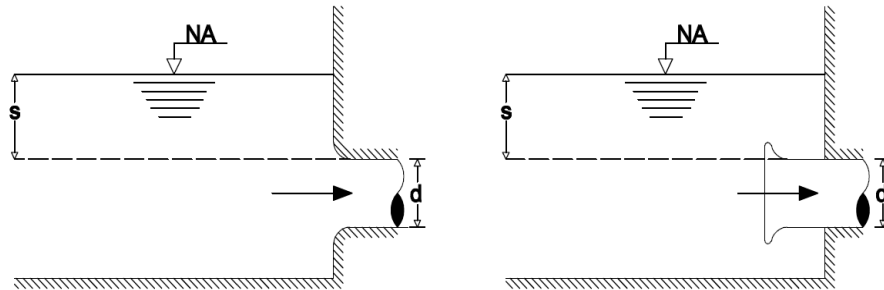


Figura 6 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação horizontal

- c) tomada de água de captação inclinada de descida, (figura 7);

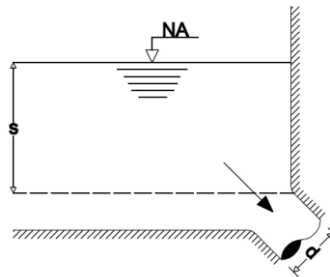


Figura 7 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação inclinada de descida

- d) tomada de água de captação inclinada de subida, (figura 8);

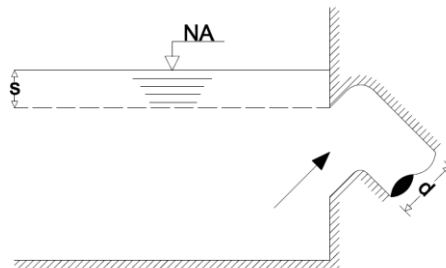


Figura 8 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação inclinada de subida

- e) tomada de água de captação vertical de subida, (figura 9);

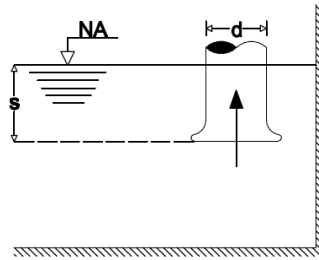


Figura 9 - Desenho esquemático de uma tomada de água com captação vertical de subida

3.1.2 Classificação das tomadas quanto ao fluxo

Segundo Schreiber(1977), as tomadas de água são classificadas quanto ao fluxo em:

- a) de reservatório, possuem velocidade de aproximação próxima de zero, (figura10);

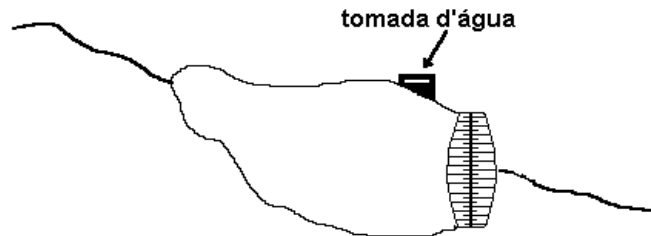


Figura 10 - Representação esquemática de uma tomada de água de reservatório

- b) de derivação com fluxo frontal, (figura 11);

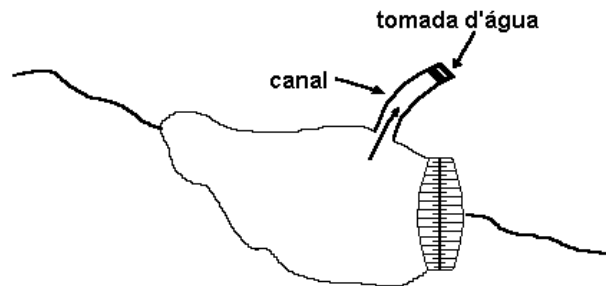


Figura 11 - Representação esquemática de uma tomada de água de derivação com fluxo frontal

- c) De derivação com fluxo lateral, (figura 12);

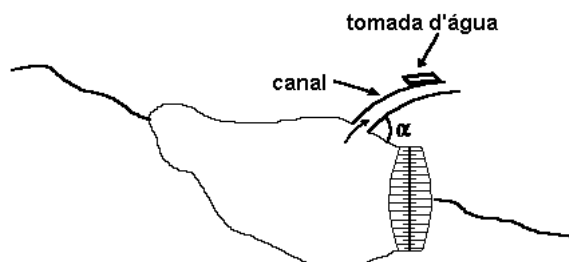


Figura 12 - Representação esquemática de uma tomada de água de derivação com fluxo lateral

3.1.3 Classificação das tomadas quanto à aproximação

Quanto às condições de aproximação, Denny e Young⁴ (1957 apud KNAUSS, 1987, p.2) classifica as tomadas de água, como tomadas de aproximação simétrica e assimétrica. A simetria da tomada diz respeito às linhas de fluxo do fluido quando da convergência da tomada e estão apresentadas na Figura 13 e Figura 14:

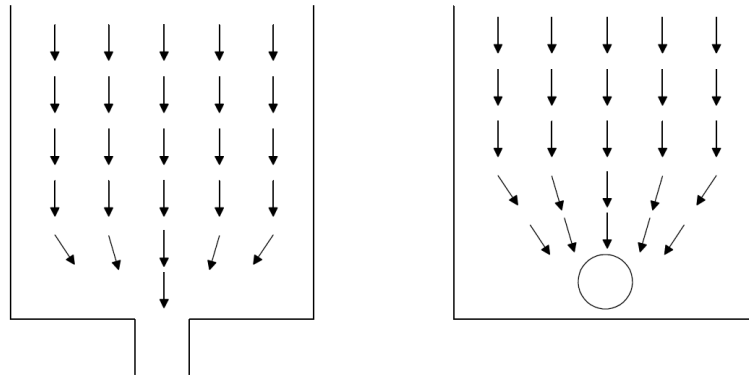


Figura 13–Representação das linhas de fluxo do fluido convergindo em uma tomada de água com aproximação simétrica

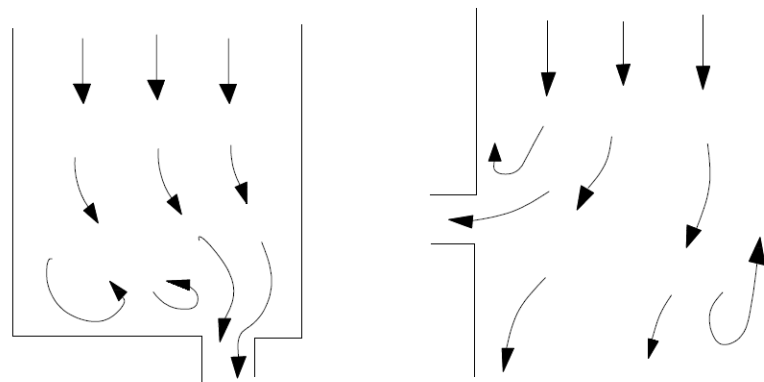


Figura 14 -Representação das linhas de fluxo do fluido próximas à tomada de água com aproximação assimétrica

3.1.4 Dimensionamento de tomadas de água

Segundo Silva (2012, p.8)

O dimensionamento de tomadas de água deve basear-se em considerações geológicas, hidráulicas, estruturais e econômicas e ser realizado de modo a evitar, durante a vida útil do projeto, problemas desnecessários de operação e manutenção.

⁴ DENNY, D. F; YOUNG, G. H. J. The prevention of vortices and swirl at intakes. In: CONGRESS LISBON, n. 7, 1957.

Mesmo existindo diversos tipos de tomadas de água, algumas regras para o seu dimensionamento são comuns. ESHA (2004) apresenta os critérios que um projetista deve levar em consideração no momento do projeto:

- a) Estruturais: dimensionamento das estruturas;
- b) hidrodinâmicos: perda de carga, velocidade de escoamento e não formação de vórtices que possibilitem a entrada de ar no sistema;
- c) operacionais: controle de sedimentos e sua limpeza;
- d) ambientais: relacionados a fauna, flora e impacto visual;
- e) dimensionamento de grelhas e comportas: proteção do conduto.

Silva (2012) estudou o escoamento em um modelo reduzido da barragem de Foz Tua, comparando dados obtidos no modelo com simulações numéricas na tomada de água. A proximidade dos resultados permitiu validar os resultados obtidos. Porém, que apesar de se obterem resultados mais rápidos e a um menor custo no modelo numérico, não foram detectados alguns fenômenos como formação de vórtices e assimetrias no perfil de velocidades.

Dessa maneira, faz-se necessário observar e estudar em modelo os limites mínimos de submergência para evitar o aparecimento de vórtices com arraste de ar. Os resultados de modelagem física salientam a necessidade de uma ferramenta mais abrangente para avaliação do fenômeno.

O engenheiro, quando da elaboração do projeto de uma tomada de água, depara-se com diversas dificuldades, podendo-se citar (Silva 2012):

- a) prevenir a formação de vórtices, especialmente os vórtices de superfície livre, cuja presença no escoamento pode trazer consequências prejudiciais, desde a redução da geração de energia, através da redução do coeficiente de descarga da tomada e queda do rendimento da turbina, até o aparecimento de vibrações.
- b) considerações da geometria do terreno visando reduzir a atração e acúmulo de detritos sólidos nas imediações da tomada de água e o seu levante desde o fundo, quando da ocorrência de operações assimétricas de partida ou retirada da geração das turbinas. Este aspecto está ligado diretamente à velocidade de aproximação junto à tomada e à flutuação de pressão junto ao fundo na entrada da tomada.

As dificuldades existentes, sob o ponto de vista técnico, para implantação das tomadas de água, encontram-se no dimensionamento e garantia de eficiência durante a operação, ainda na fase de projeto.

3.2 VÓRTICES

Para Casamassa Neto (1991, p1):

Pode-se definir um vórtice, como sendo movimento de um fluido, com trajetórias circulares concêntricas.

O movimento circular de um elemento fluido pode ser caracterizado pela vorticidade, uma grandeza vetorial que representa a tendência das partículas fluidas de girar em torno de seu eixo, a presença de vorticidade não implica necessariamente na formação de vórtices. Möller (2013).

Casamassa Neto (1991) analisou estudos sobre as condições de formação, predição e maneiras de prevenção de vórtices, em tomadas de água e poços de sucção de bombas, destacando que a modelagem física é necessária quando se requer a garantia que o vórtice não ocorrerá. O autor conclui que o estudo de formação de vórtices é de difícil análise e representação, dada a complexidade e o número de fatores envolvidos.

Ferreira e Genovez (2001) mostraram que, a presença de vórtices com arraste de ar, reduz a vazão da tomada em 50%, levando a turbina a uma perda de eficiência de 70%. Para a mesma condição, houve redução no valor da potência em aproximadamente 50%. A Figura 15 apresenta um vórtice hidráulico com entrada de ar em uma tubulação transparente.



Figura 15 -Vórtice desenvolvido desde a superfície, com entrada de ar, em uma tubulação transparente
(fonte: Möller 2013)

3.2.1 Classificação dos vórtices

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, fixando que os vórtices se classificariam em 6 tipos: desde tipo 1, vórtice fraco, até tipo 6, intenso com núcleo de ar, conforme a Figura 16 e o Quadro 1.

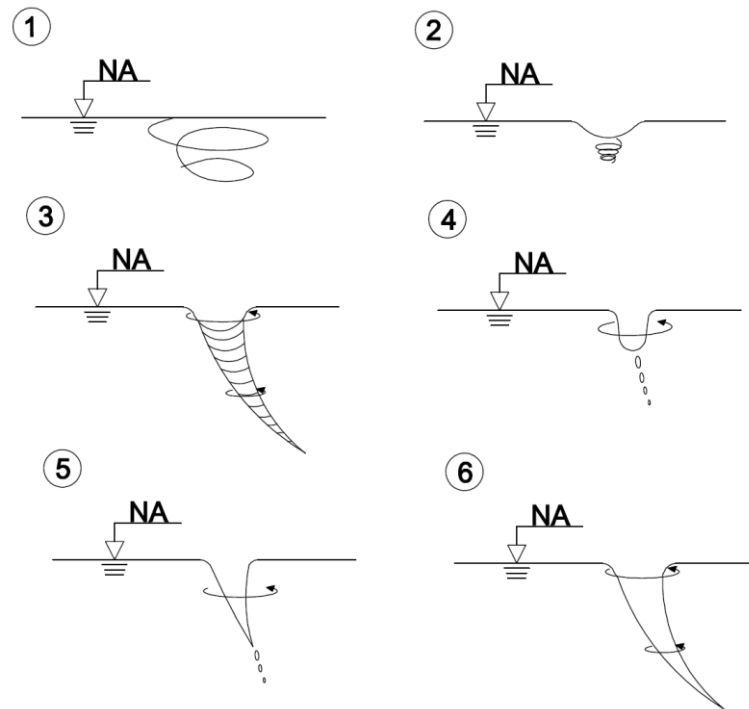


Figura 16—Classificação dos tipos de vórtices quanto a sua intensidade
(fonte: adaptado de Padmanabhan e Hecker 1983)

VÓRTICE	DESCRIÇÃO
1	Rotação superficial sem depressão
2	Depressão superficial
3	Formação de núcleo sem a presença de ar
4	Sucção de partículas flutuantes, sem sucção de ar
5	Bolhas de ar engolidas pela tomada
6	Núcleo desenvolvido da superfície até a tomada

Quadro 1 -Descrição dos tipos de vórtice segundo Padmanabhan e Hecker
(fonte: adaptado de Padmanabhan e Hecker, 1983)

Sarkardeh, Zarrati e Roshan (2010) estudaram em um modelo reduzido o efeito da inclinação da parede acima da entrada da tomada de água na formação de vórtices. Foram medidos parâmetros como velocidade tangencial dos vórtices através de ADV, submergência e vazões, além da variação da inclinação da parede sobre a tomada. Foi constatado que os vórtices têm sua intensidade diminuída quando a inclinação da parede se aproxima da posição vertical.

Os autores utilizaram uma nova maneira para agrupar os tipos de vórtices devido a dificuldade para diferenciar sua intensidade, foi proposta uma nova diferenciação com os vórtices divididos em três faixas: Classe A para os vórtices fortes, Classe B para os vórtices médios e Classe C para os vórtices fracos. Sendo que vórtices classe A e B observados foram classificados como prejudiciais a estrutura.

3.2.2 Dispositivos antivórtices

Os dispositivos antivórtices são estruturas construídas para alterar condições favoráveis à formação de vórtices, geralmente são instaladas próximo as tomadas de água. Estas melhorias no protótipo são possíveis, no entanto, provavelmente causarão restrições operacionais.

Martim⁵ (1983 apud FERREIRA, 2001, p. 28):

É antieconômico projetar estruturas hidráulicas considerando como fator decisivo a não ocorrência de vórtices e propõe algumas pequenas modificações que podem ser feitas sem alterar muito o *layout* da obra, usando alguns dispositivos antivórtice.

Aoki (1982) apresenta exemplos de alguns dispositivos antivórtices, utilizados em modelos físicos de tomadas de água. Os dispositivos para prevenção do vórtice têm objetivo de dificultar a formação de vorticidade próximo à embocadura ou afastar o núcleo do vórtice da tomada, figura 17.

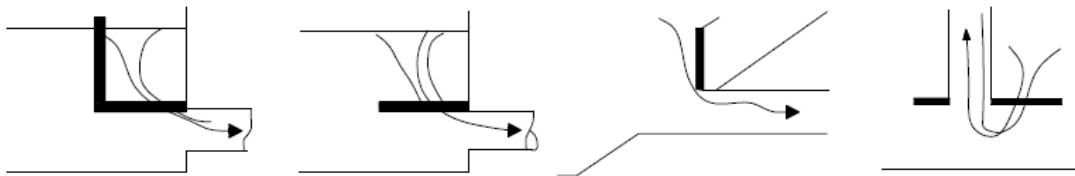


Figura 17 -Dispositivos antivórtice utilizados junto à tomada de água
(fonte: adaptado de Aoki 1982)

3.3 SUBMERGÊNCIA EM TOMADAS DE ÁGUA

Segundo Casamassa Neto (1991, p. 45), “Submergência, *S*, de uma tomada d’ água, é definida como a profundidade de água, desde a superfície livre até a entrada na tubulação (bordo superior).”

⁵ MARTIM, R. Vórtices em estruturas hidráulicas. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, n. 594, p. 3-14, Lisboa, 1983.

Juntamente com a velocidade do escoamento no conduto forçado e as condições de aproximação do fluxo hidráulico, é um dos fatores determinantes para a formação de vórtices com arraste de ar, que causam prejuízos as estruturas.

Casamassa Neto (1991, p.45) afirma que “Para qualquer tomada de água, existe um valor mínimo ou crítico de submersão, denominado submersão crítica, S_{cr} , abaixo do qual poderá ocorrer de vórtices com arraste de ar”. A Figura 18 apresenta de forma esquemática os elementos para cálculo da submersão crítica.

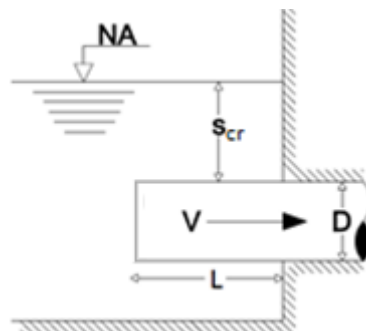


Figura 18—Elementos para cálculo da submersão crítica, (S_{cr})
(fonte: elaborado pelo autor)

Möller (2013) destaca que atualmente a submersão crítica, é o critério mais utilizado nos projetos para controlar a entrada de ar na tomada.

O Quadro 2 apresenta as diferentes fórmulas encontradas na literatura para cálculo da submersão crítica. Estas equações foram utilizadas para comparação junto aos dados adquiridos e delimitação das áreas gráficas onde existe diferença de intensidade na formação de vórtices.

Gordon (1970)	$S_{cr} = K \cdot V \cdot \sqrt{D}$ k=0,545 tomada simétrica e k=0,725 tomada assimétrica
Blaisdell (1989)	$S_{cr} = 1,70 \cdot F$ tomada simétrica $S_{cr} = 2,23 \cdot F$ tomada assimétrica
Gulliver et al (1986)	$S_{cr} = D \cdot (1,7 + F)$
Knauss (1987)	$S_{cr} = 2 \cdot D \cdot F$ para $S \geq D$
Hecker (1981)	$S_{cr} = D \cdot (0,5 + 2,3 \cdot F)$
AFNOR ⁶ (1989 apud Brito, 2010, p. 18)	$S_{cr} = 1,5 \cdot DF < 0,5$ $S_{cr} = D \cdot (0,5 + 2 \cdot F)$ $F > 0,5$
Amphlet ⁷ (1976 apud Knauss, 1987, p. 62)	$\frac{S_{cr}}{D} = -0,5 + 3,95 \cdot \sqrt{F}$
ANSI ⁸ (1989 apud Brito, 2010, p. 18)	$S_{cr} = D \cdot (1 + 2,3 \cdot F)$
Berge (1966)	$\frac{S_{cr}}{D} = 0,25 + 3,3 \cdot \sqrt{F}$
Chang(1979)	$\frac{S_{cr}}{D} = 1,35 \cdot F$
Jain (1978)	$\frac{S_{cr}}{D} = 4,5 \cdot \sqrt{F}$
Ferreira Borin e Genovez (2000)	Vórtice tipo 6, $S/D < 0,5$; sem vórtice, $S/D > 3,0$

Quadro 2 -Fórmulas encontradas na literatura para cálculo da submergência crítica
(Fonte: elaborado pelo autor)

onde, S_{cr} é a submergência crítica, F é o número de Froude do escoamento dentro do tubo, D é o diâmetro da tomada e K é a constante de aproximação. A equação 3.3.1 apresenta os elementos para cálculo do número de Froude.

$$F = \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} \quad (3.3.1)$$

onde F é o número de Froude do escoamento dentro do tubo, D é o diâmetro da tomada e V é a velocidade do escoamento no tubo.

A figura 19 apresenta a relação S_{cr}/D em relação ao número de Froude para as fórmulas apresentadas na Tabela 2, pode-se notar uma diferença na declividade das retas. Julga-se que isso se deve ao tipo de vórtice considerado por cada autor, pelo tipo de tomada estudado, pelas condições de escoamento, pelas condições de aproximação, dentre outros fatores.

⁶AFNOR E44-203.(1989) Association Française de Normalisation.

⁷KNAUSS, J. Prediction of critical submergence. In: (Coord.;Ed.). **SwirlingFlow Problems at Intakes**. Rotterdam: Balkema, 1987a. p. 57-76.

⁸ANSI/HI 9.8. (1989). American National Standard for Pump Intake Design. Hydraulic Institute.

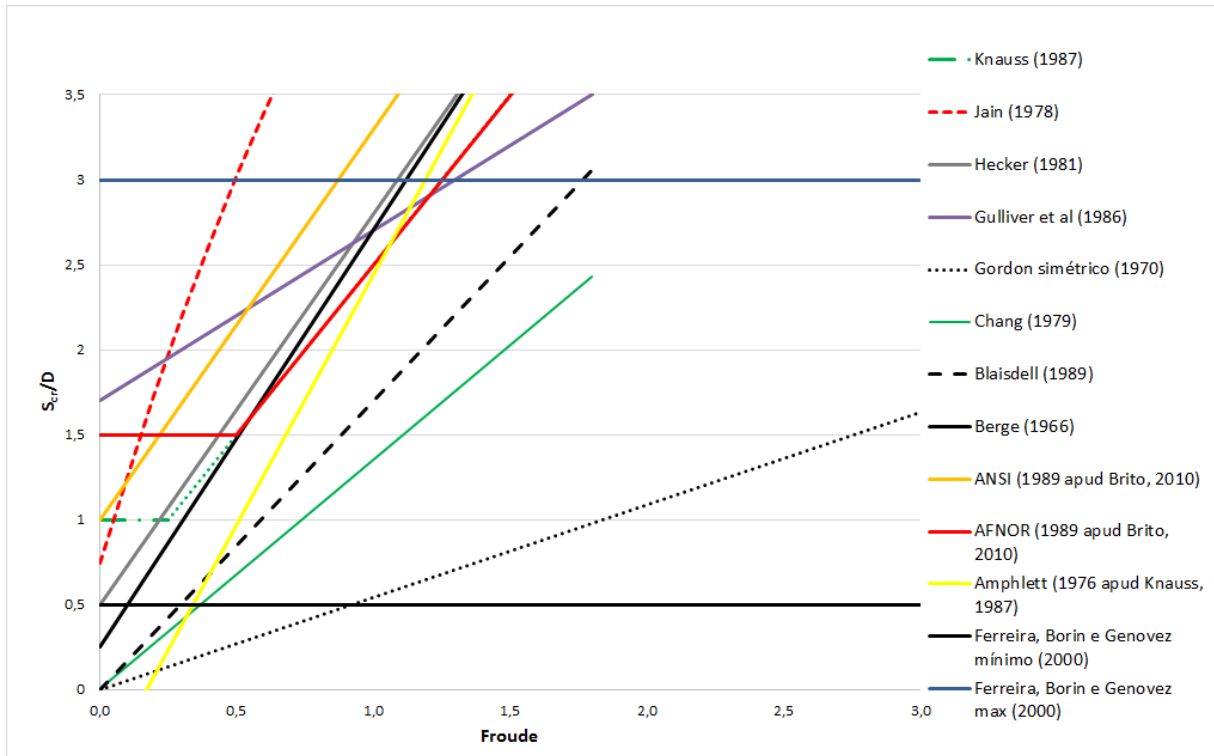


Figura 19 –Declividade das curvas apresentadas pela bibliografia para cálculo da S_{cr}
(fonte: elaborado pelo autor)

Segundo Gulliver, Rindels e Lindblom (1986) o principal problema no projeto de tomadas de água é determinar a submersão mínima necessária para evitar a formação de vórtices. A submersão depende, principalmente, do diâmetro da tomada, do ângulo de aproximação do fluxo, das dimensões da estrutura próxima à tomada e do número de Froude. Pelas conclusões dos autores, ocorreriam vórtices para regiões definidas por número de Froude maior que 0,5 e S/D menor que 0,7.

Knauss (1987), analisou resultados de pesquisas anteriores para desenvolver uma equação generalizada para submersão crítica. A equação está dada por:

$$\left(\frac{S_{cr}}{D}\right) = \frac{k \cdot c}{\frac{3}{d^2} \cdot \sqrt{g}} = k \cdot N_c \cdot F \quad (3.3.2)$$

Onde: k é a constante relação linear, S é a profundidade da tomada até o centro do conduto, D é o diâmetro do conduto, F é o número de Froude do escoamento, v é a velocidade do escoamento na tomada, $N_c = c/(V \cdot D)$, c é a constante de circulação $V_i \cdot r$, V_i é velocidade tangencial de aproximação do escoamento e r é o raio do vórtice formado.

Knauss (1987) utilizando a fórmula (3.3.2) relacionou-a com análises em quatro tipos de tomadas de água: escoamentos em orifícios, tomadas verticais de descida, verticais de subida e horizontais, sempre encontrando relações lineares para k (constante de relação

linear), indicando que o cálculo da submergência crítica pode ser analisado segundo a equação:

$$\left(\frac{S_{cr}}{D}\right) = 0,5 + 2 \cdot F \quad (3.3.3)$$

onde: S_{cr} é a submergência crítica da tomada, D é o diâmetro da tomada e F o número de Froude.

No que se refere à submergência crítica, Yildirim e Kocabas (1998) concluíram que esse parâmetro varia com a distância da tomada ao fundo do reservatório.

Ferreira, Borin e Genovez (2000), definiram condições para a formação de vórtices relacionada à submergência mínima. Concluíram que o valor mínimo necessário para evitar vórtices com arraste de ar é dado por S/D igual a 0,5, sendo que para valores de S/D maiores que 3,0, não há a formação de vórtices.

Ferreira e Genovez (2005) concluíram que algumas das razões para grande diferença entre os resultados dos trabalhos apresentados diz respeito ao tipo de tomada analisada, ao tipo de vórtice considerado e a definição de submergência, que pode ser considerada a partir da geratriz superior da tubulação, do centro da tubulação ou ainda a altura total de água, desde o fundo do reservatório.

Gordon (1970), investigou fatores que geram a formação de vórtices, baseado no estudo de 29 tomadas de água de usinas hidrelétricas existentes. Estes fatores são a geometria de aproximação, o diâmetro da tomada, a submergência e a velocidade. Das tomadas investigadas, as com aproximação assimétrica teriam maior disposição para a formação de vórtices, porém devido à singularidade de cada projeto estes fatores foram desprezados e sua investigação concentrou-se na relação da submergência em função da velocidade.

Os resultados são apresentados no gráfico reproduzido pela figura 20. O gráfico é dividido por duas retas onde a parte superior das retas indica a região onde não ocorrem vórtices. Na região inferior as retas ocorrem vórtices com arraste de ar e a região entre as retas indica as tomadas com valores de submergência mínima.

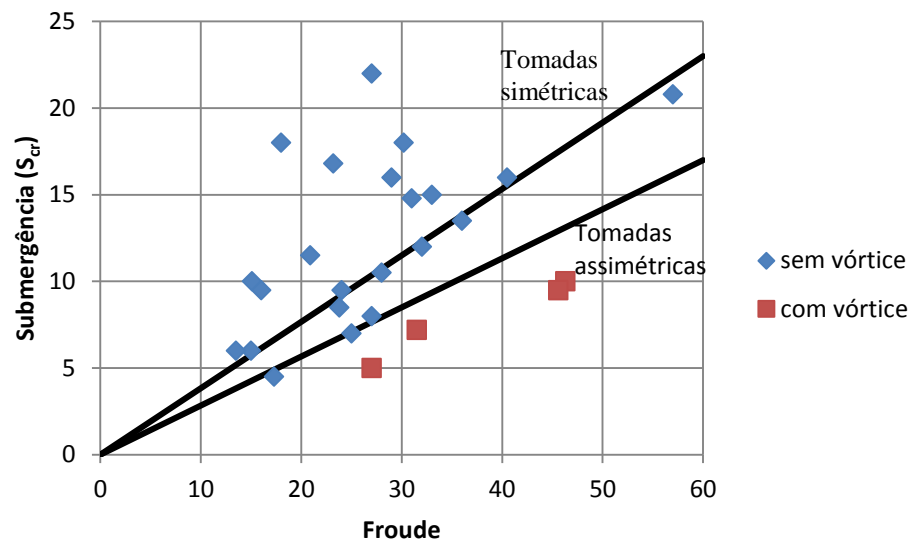


Figura 20 -Limites de submergência mínima para tomadas com aproximação simétrica e assimétrica (Fonte: adaptado de Gordon 1970).

O resultado da análise destes dados resultou na equação empírica, a seguir:

$$S_{cr} = C \cdot V \cdot D^{0,5}, \quad (3.3.4)$$

onde: S é a submergência na tomada, C o coeficiente de aproximação, V a velocidade na tomada e D é o diâmetro da tomada na seção da comporta. Os valores do coeficiente de aproximação, em unidades métricas, são de 0,5434 para aproximação simétrica e 0,7245 para aproximação assimétrica.

Blaisdell (1989) analisou a expressão (3.3.4) dividindo a mesma por D e acrescentou ao lado direito a raiz quadrada da aceleração da gravidade g, tornando a mesma adimensional.

$$\frac{S_{cr}}{D} = C' \cdot \frac{V}{\sqrt{g \cdot D}} = C' \cdot F, \quad (3.3.5)$$

onde: S_{cr} é a submergência crítica $C' = C \cdot \sqrt{g}$ e torna-se: C'=2,27 para aproximação assimétrica, C'=1,70 para aproximação simétrica e F é o número de Froude.

A Eletrobrás (2003) em seu manual de projetos de usinas hidroelétricas utiliza-se da fórmula (3.3.4) apresentada por Gordon para cálculo da submergência crítica.

3.4 CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA

3.4.1 Leis de semelhança

O estudo de formação de vórtices em tomadas de água é realizado com o escoamento agindo por força da gravidade, ou seja, à superfície livre. Em escoamentos à superfície livre é aplicada a Lei de Semelhança de Froude, não sendo considerada a influência das forças viscosas e da tensão superficial. Kleynhans (2012).

Sendo assim, a lei da semelhança de Froude obedece à seguinte relação entre o modelo e o protótipo:

$$Fr = \frac{V_m}{\sqrt{g \cdot h_m}} = \frac{V_p}{\sqrt{g \cdot h_p}}, \quad (3.4.1)$$

onde, Fr é o número de Froude, V_m é a velocidade do escoamento no modelo, V_p é a velocidade do escoamento no protótipo, g é a aceleração da gravidade, h_m é a profundidade do modelo, e h_p é a profundidade do protótipo.

3.4.2 Efeitos de escala

As condições de semelhança entre modelo e protótipo levam a uma reprodução fiel das condições do escoamento, entretanto é impossível a redução de todos os elementos envolvidos e estes fatores podem levar a distorções, chamadas de efeito de escala. Os efeitos de escala no caso de escoamentos podem ser decorrentes da viscosidade e da tensão superficial.

Efeitos de escala relativos à tensão superficial nas equações de semelhança dinâmica, dada pela análise dimensional, aparecem através do número de Weber sendo este uma relação entre as forças de inércia e de tensão superficial. Kleynhans (2012).

$$We = V^2 \cdot \frac{\rho \cdot D}{\sigma}, \quad (3.4.2)$$

onde, We é o número de Weber, V é a velocidade do escoamento no conduto, ρ é a massa específica do líquido, D é o diâmetro do conduto, σ é a tensão superficial.

Os efeitos de escala devido à viscosidade são estabelecidos pelo número de Reynolds, onde a bibliografia ainda discute um valor mínimo, a partir do qual o escoamento não seja mais dependente de Reynolds. Kleynhans (2012).

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}, \quad (3.4.3)$$

onde, Re é o número de Reynolds, V é a velocidade no conduto, D é o diâmetro do conduto e ν é a viscosidade cinemática.

3.4.3 Condições de semelhança encontradas

ANWAR (1966) estudou a formação de vórtices de fraca intensidade num tanque com orifício no fundo, concluindo que a formação de vórtices fracos não depende do número de Reynolds radial, desde que esta relação seja maior que 10^3 .

$$Re_r = \frac{Q}{\nu S}, \quad (3.4.4)$$

onde: Q é a vazão em volume, ν a viscosidade cinemática e S é a submergência e Re_r é o número de Reynolds radial.

Daggette Keulegan (1974) investigaram a influência dos números de Reynolds (Re) e Weber (We) na formação de vórtices. Utilizando misturas de glicerina e óleos para obterem diferentes valores de tensão superficial e viscosidade, provocaram a formação de vórtices em dois tanques cilíndricos de dimensões distintas. Variando o diâmetro do orifício de entrada, simularam diferentes tomadas e mudaram a posição das pás que direcionavam a entrada do escoamento. Os autores chegaram à conclusão de que para números de Reynolds maiores que 50.000 a tensão superficial não afeta a formação de vórtices.

No que diz respeito às condições de semelhança, Anwar, Weller e Amphlet (1978), concluíram que, para valores de número de Reynolds radial maior que 34.000, é possível desprezar os efeitos da tensão superficial. Os autores determinaram que os parâmetros adimensionais importantes na formação de vórtices são o adimensional da submergência dividido pelo diâmetro, números de Reynolds, Weber e Reynolds radial.

Jain e Raju (1978) destinaram seus estudos à avaliação dos efeitos gravitacionais e da tensão superficial da água na elaboração de um critério para a determinação da submergência crítica, definida como sendo a submergência a partir da qual o vórtice formado começa a arrastar ar. Os autores concluíram que, para números de Weber maiores que 120, os efeitos da tensão superficial na submergência crítica são desprezíveis.

Aoki (1982) realizou uma pesquisa bibliográfica sobre a formação de vórtices em tomadas de água, concluindo que o fenômeno não está completamente elucidado, destacando, inclusive, alguns estudos com conclusões contraditórias.

Ferreira e Genovez (2001) observaram 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 34000 e de Weber acima de 120 para não haver efeito de escala.

3.5 ANÁLISE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo deste capítulo pode-se constatar uma quantidade significativa de variáveis que influenciam no fenômeno de formação de vórtices junto às tomadas de água. As diferenças no tipo de captação, condições de aproximação e fluxo de entrada nas tomadas de água, ou na sensibilidade e subjetividade na classificação da intensidade dos vórtices, faz com que as pesquisas realizadas apontem resultados pouco conclusivos quando se pretende encontrar uma submergência crítica para formação de vórtices com arraste de ar.

Os dados existentes nos trabalhos pesquisados, Figura 19, apresentaram diferentes formulações de equações e dos valores dos coeficientes para a faixa de operação dos modelos sem a necessidade de levar-se em consideração os efeitos de escala. Esta diferença evidencia que cada modelo com suas dimensões, tipos de líquido utilizado, método de ensaio e condições de contorno traz a conclusões por vezes singulares. Assim, se faz necessário verificar quais relações entre os modelos são válidas para se fazerem análises comparativas entre os resultados.

O Quadro 3 apresenta um resumo das condições de semelhança encontradas na literatura.

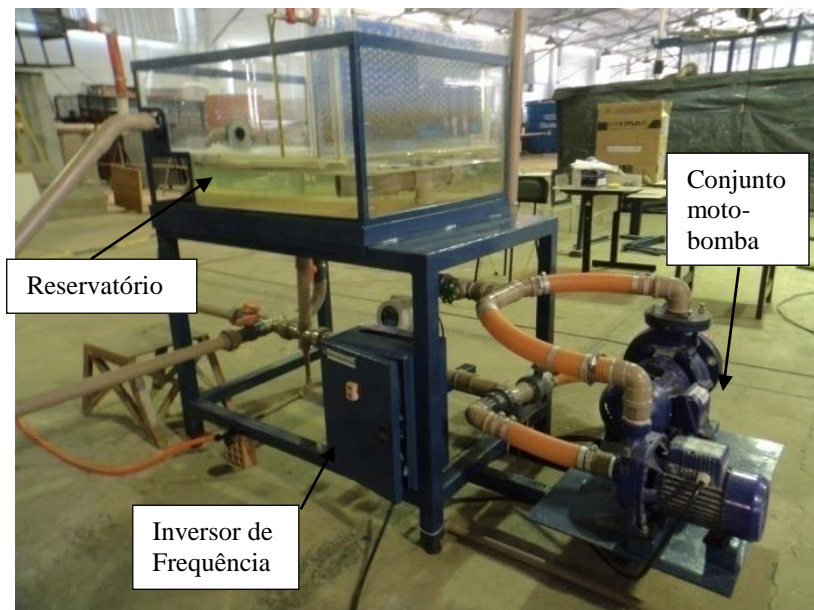
AUTOR	Faixa de número de Reynolds e Weber
ANWAR (1966)	$Re_r \geq 1.000$
DAGGETT E KEULEGAN (1974)	$Re \geq 50.000$
ANWAR, WELLER e AMPHLET (1978)	$Re_r \geq 34.000$
JAIN e RAJU (1978)	$We \geq 120$
GULLIVER, RINDELS e LINDBLOM (1986)	$Fr \geq 0,5$ $S/D < 0,7$
FERREIRA e GENOVEZ (2001)	$Re_r \geq 34.000$ $We > 120$

Quadro3: Condições de semelhança encontradas na literatura

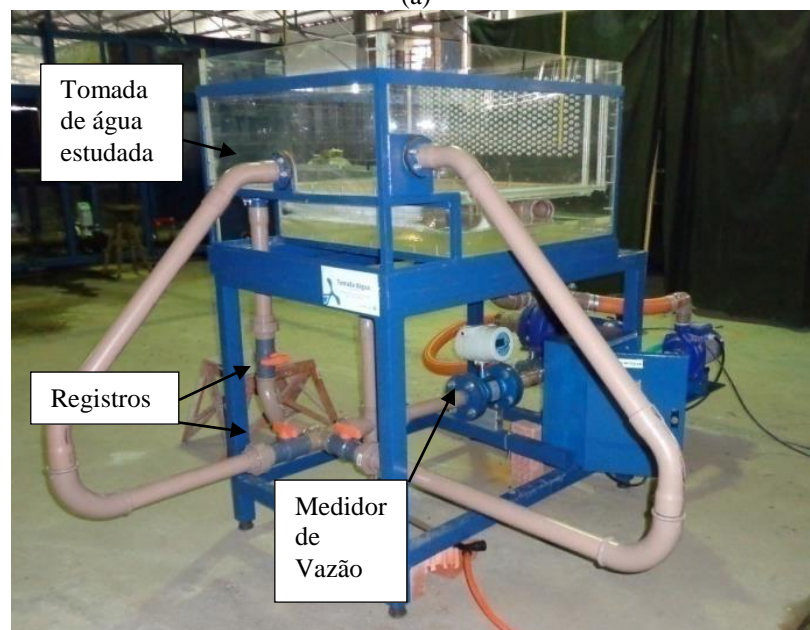
(Fonte: elaborado pelo autor)

4 METODOLOGIA DA PESQUISA

Os dados experimentais foram obtidos em um modelo físico de laboratório, com características genéricas, de uma tomada de água. O modelo está localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas – IPH/UFRGS. A estrutura utilizada está apresentada nas Figuras 21(a) e 21(b). Para a realização da pesquisa as variáveis controladas durante os ensaios foram a submersão e a vazão.



(a)



(b)

Figura 21 (a) e (b) - Estrutura modelo LOH 2, utilizado na pesquisa

(Fonte: foto do autor)

O modelo experimental é um protótipo de pequenas dimensões, que consiste em uma bomba centrífuga ligada a um circuito que alimenta o reservatório, o qual contém três tomadas d'água de diâmetro nominal de 50 mm, sendo: uma vertical assimétrica e duas horizontais, destas, uma simétrica e outra assimétrica. O sistema é composto, ainda, por duas motobombas em paralelo, um inversor de frequência, um medidor de vazão eletromagnético de 50 mm, sete registros tipo esfera para controlar e direcionar o escoamento e um tranquilizador em acrílico. A entrada de água no sistema está localizada abaixo do nível do reservatório, para minimizar o efeito rotacional que o bombeamento provoca no escoamento na condição de circuito fechado.

Nesta pesquisa foi utilizada apenas a tomada de captação horizontal simétrica, variando a reentrância da tomada de água. Foram utilizadas tomadas junto a parede (0 diâmetro) e com reentrâncias de 0,5, 1 e 1,5 diâmetros. A figura 22 apresenta os quatro tipos de tomada de água analisados.

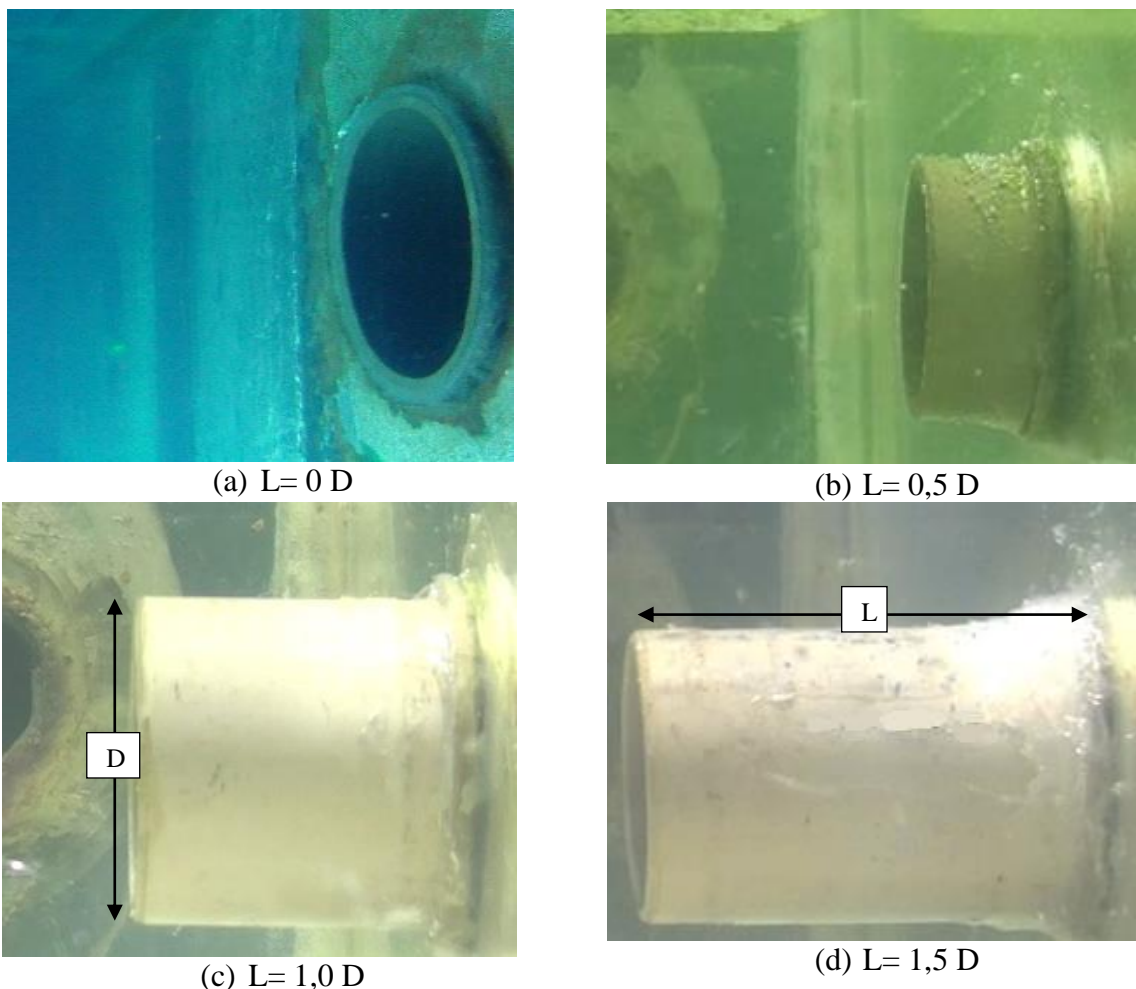


Figura 22 -Tomadas de água estudadas (a) sem reentrância ($L=0$), (b) reentrância de 0,5 D ($L=0,5$), (c) reentrância de 1 D ($L=1$) e reentrância de 1,5 D ($L=1,5$)

(Fonte: foto do autor)

Durante a realização dos ensaios o nível de água no reservatório foi mantido constante, já que o sistema opera em circuito fechado. Para alterar a submergência, ao final de cada bateria de ensaios em um determinado nível, é necessário aumentar ou diminuir o volume de água no reservatório. Foram estudados quatro níveis de submergência 0,5; 1; 1,5 e 2 diâmetros acima do nível da geratriz superior da tomada, medidos por réguas localizadas na parede lateral do reservatório.

A vazão foi medida e controlada por medidor de vazão eletromagnético. Está instalado junto ao conjunto motobomba um inversor de frequência, que tem a finalidade de controlar a rotação da bomba mantendo-a constante, com a finalidade de uniformizar a vazão durante período do ensaio.

O Quadro 4 apresenta as vazões utilizadas na pesquisa e os respectivos adimensionais

Q l/s	Froude	Reynolds	Weber
0,40	0,308	10311,928	30,455
0,53	0,408	13663,305	53,468
0,79	0,607	20366,058	118,794
0,80	0,615	20623,856	121,821
1,05	0,807	27068,811	209,856
1,20	0,923	30935,784	274,097
1,60	1,230	41247,712	487,284
2,00	1,538	51559,641	761,381
2,40	1,845	61871,569	1096,389
2,80	2,153	72183,497	1492,307
3,20	2,461	82495,425	1949,135
3,60	2,768	92807,353	2466,874
4,00	3,076	103119,281	3045,524

Quadro4 -Vazões utilizadas na pesquisa em l/s

(Fonte: elaborado pelo autor)

A figura 23 faz a comparação dos dados obtidos na pesquisa em relação as recomendações quanto a existência de efeito de escala na literatura, onde observa-se que:

- a) Os ensaios atendem as recomendações de Gulliver et al (1986) e Jain e Raju (1978) a partir de Froude igual a 0,607;
- b) Para Froude igual a 1,23 são atendidos os critérios propostos por Anwar et al.(1978);

- c) Os escritores Dagget e Keulegan (1974) têm seus critérios atendidos para Froude igual a 1,538;
- d) Para atender os critérios estabelecidos pelos autores seria necessário um modelo com dimensões três vezes maior, o que se tornou inviável por questões de espaço e custo.

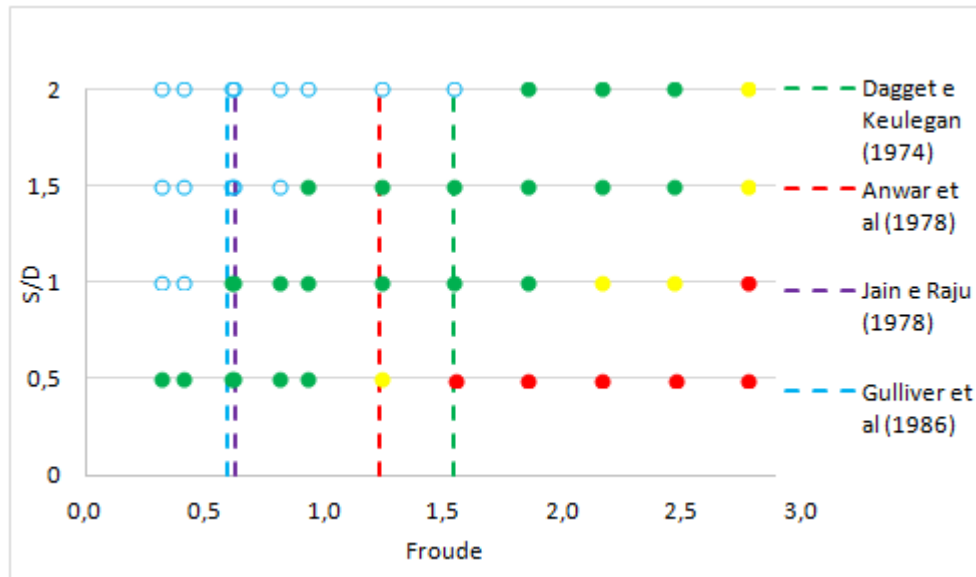


Figura 23 Comparação entre os limites sugeridos pela bibliografia para evitar o efeito de escala e os dados da pesquisa

(Fonte: elaborado pelo autor)

Os ensaios visando a pesquisa tiveram 7 minutos de duração. A análise consistiu em registrar a frequência de aparecimento do vórtice, sua classificação de acordo com as seis intensidades propostas por Padmanabhane Hecker (1983), e registrar o seu tempo de permanência. Os autores propõem ensaios com tempo maior de duração, 30 minutos, para classificação de vórtices e verificação do seu tempo de permanência no ensaio examinado. Porém em ensaios preliminares realizados verificou-se empiricamente que com 7 minutos após a estabilização do escoamento, já é possível caracterizar o tipo de vórtice.

Para aplicação deste intervalo de tempo, utilizou-se um ensaio de 30 minutos, conforme sugerido pelo autor. Foi escolhido o ensaio de $1,5D$, $Q = 2,40 \text{ l/s}$ e $S = 1,0D$ pois é o ensaio que apresentou maior dinâmica de alteração na frequência e intensidade dos vórtices. Assim, o intervalo foi dividido em sub-intervalos de 15 minutos, 10 minutos, 7 minutos e 5 minutos. Para o primeiro sub-intervalo testado o ensaio foi dividido em 2 intervalos de 15 minutos, no segundo sub-intervalo ensaio foi dividido em 3 intervalos de 10 minutos, para o tempo de 7 minutos também foram utilizados 3 intervalos e para o intervalo de 5 minutos houve a divisão em 4 intervalos. Até o intervalo de sete minutos todos os ensaios apontaram o mesmo tipo de

vórtice predominante, o que não foi encontrado no intervalo de cinco minutos onde dois intervalos acabaram por apresentar intensidade diferente da predominante nos outros intervalos.

O sistema de medição foi composto por duas câmeras de filmagem, modelo SONY HDR-XR350, com velocidade de captação de 60 quadros por segundo, uma na posição horizontal sobre a tomada, auxiliando nos escoamentos com baixo efeito rotacional, e outra na posição vertical ao lado da tomada, com a função de captar a intensidade dos vórtices, a partir de vórtices com depressão superficial. Visando auxiliar na observação superficial do escoamento, foi utilizado como traçador pó de giz.

A metodologia utilizada para classificação do tipo de vórtice se dá pela permanência por um determinado tempo de uma intensidade de vórtice identificada através da imagem do ensaio. Um exemplo de ensaio pode ser visualizado na Figura 24, que apresenta o ensaio realizado para a tomada d'água com reentrância de 1,5 diâmetros, para a submergência 1 diâmetro e vazão de 2,4l/s, onde são identificados a intensidade dos vórtices e seu período de permanência nesta situação ao longo do tempo de análise.

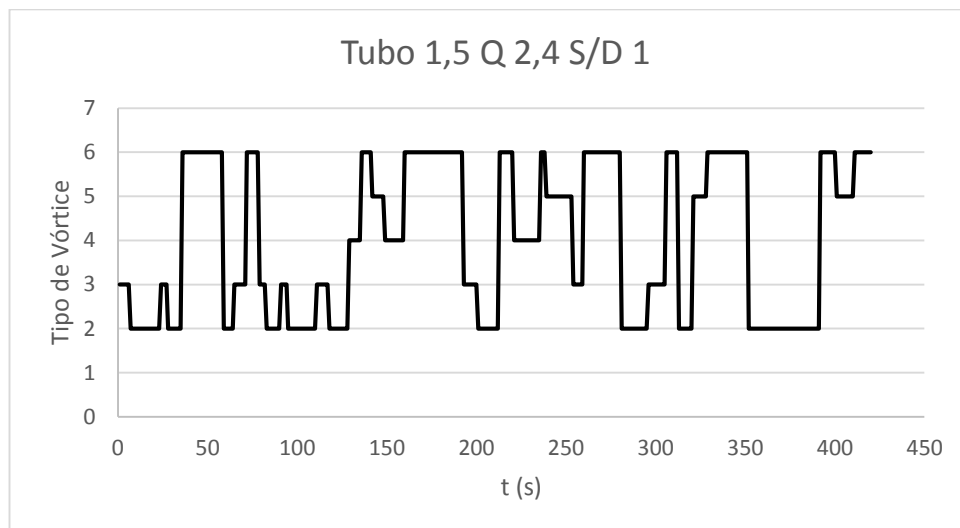


Figura 24 -Tempo de permanência dos vórtices no ensaio (T1,5D_Q2,4_S/D1)

(Fonte: elaborado pelo autor)

A classificação dos vórtices por sua intensidade, conforme apresentado pelos autores Padmanabhan e Hecker (1983), foi adaptada para esta pesquisa. Devido à subjetividade nas leituras para identificação da intensidade dos vórtices e a instabilidade no fenômeno, foi simplificada a sua escala de graduação. Mesmo que os vórtices durante a análise dos dados tenham sido classificados conforme a indicação dos autores, com nível de força de 1 a 6, estes

vórtices foram novamente agrupados de forma a minimizar a subjetividade na leitura, os seis tipos de vórtices propostos passaram a ter a classificação apresentada conforme o Quadro 5.

VÓRTICE	DESCRIÇÃO	PROPOSTA
0	Sem vórtice	a – Sem vórtice
1	Rotação superficial sem depressão	b- Vórtices fracos (incipientes)
2	Depressão superficial	
3	Formação de núcleo sem a presença de ar	c - Vórtices críticos (aceitáveis)
4	Sucção de partículas flutuantes, sem sucção de ar	
5	Bolhas de ar engolidas pela tomada	d - Vórtices fortes (de bloqueio)
6	Núcleo desenvolvido da superfície até a tomada	

Quadro 5 – Classificação dos vórtices sugerida pelo autor

(Fonte: elaborado pelo autor)

As Figuras 25 a30 ilustram a proposta utilizada para classificação dos vórtices segundo sua intensidade nesta pesquisa.

a) sem vórtices;

b) vórtices fracos (incipientes):

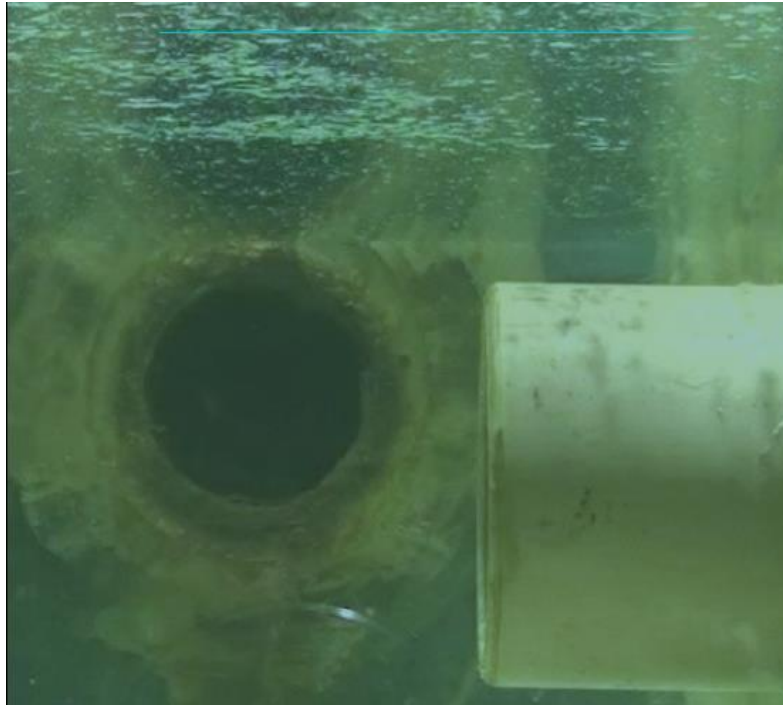


Figura 25 -Rotação superficial, sem depressão (ensaioT1_Q0,8_S/D1)

(Fonte: foto do autor)

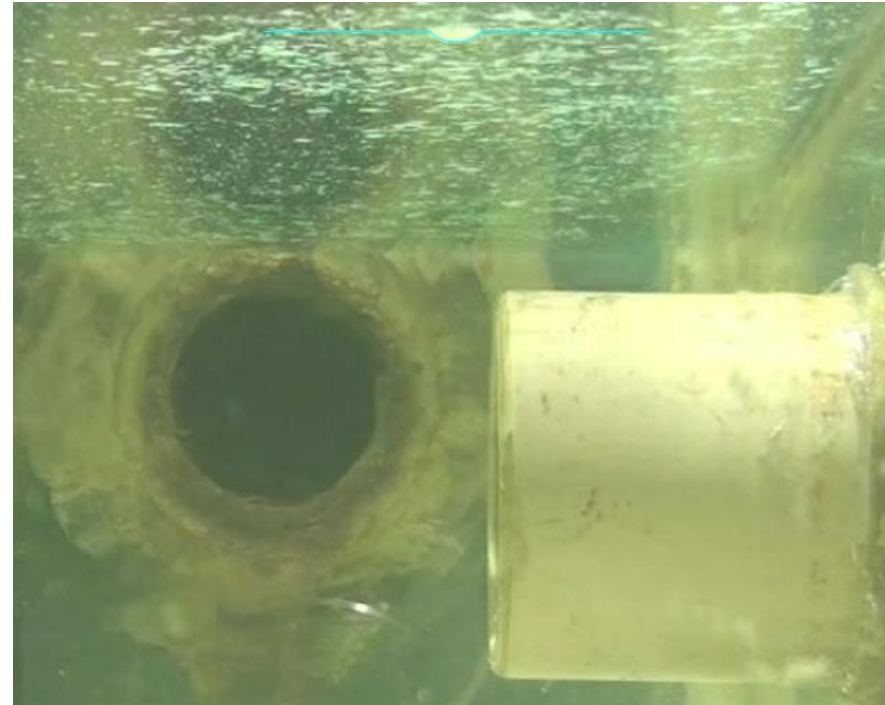


Figura 26 -Depressão superficial (ensaioT1_Q1,2_S/D1)

(Fonte: foto do autor)

c) vórtices críticos (aceitáveis):

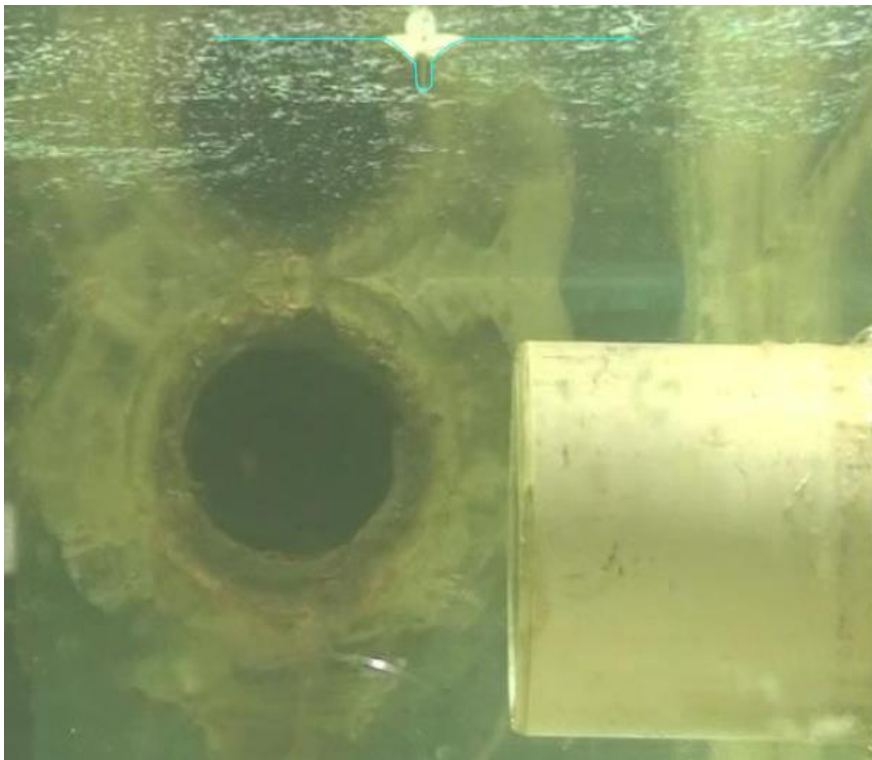


Figura 27 - Formação de núcleo sem a presença de ar (ensaioT1_Q2,0_S/D1)

(Fonte: foto do autor)

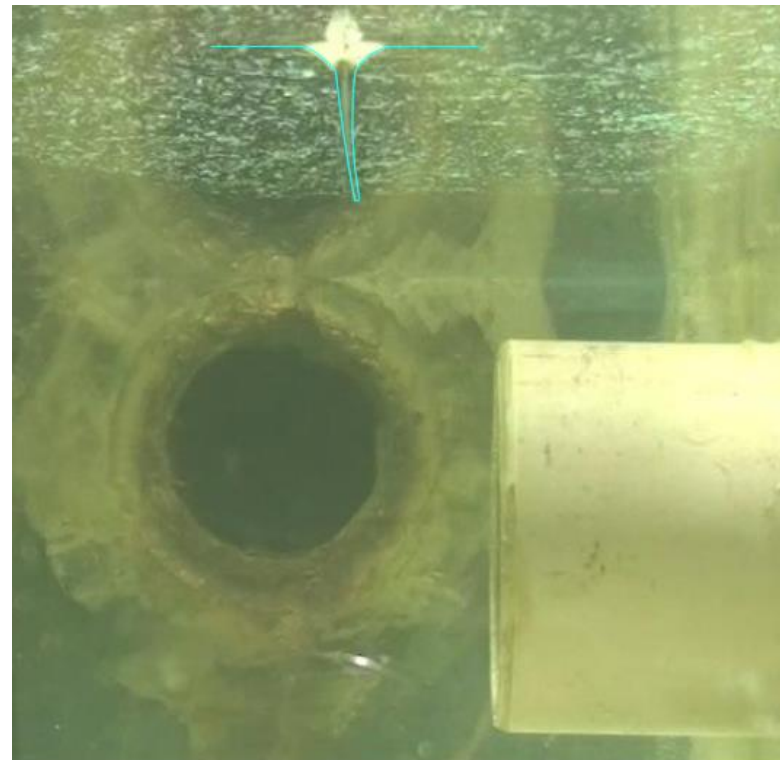


Figura 28 - Sucção de partículas flutuantes, sem sucção de ar (ensaioT1_Q2,8_S/D1)

(Fonte: foto do autor)

d) vórtices fortes (de bloqueio):

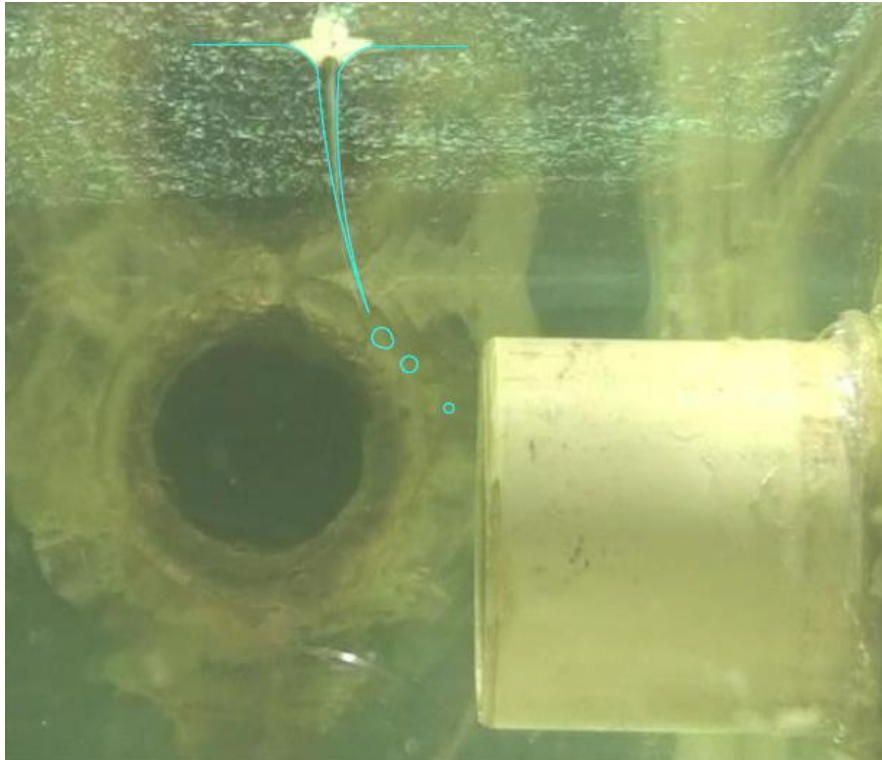


Figura 29 - Bolhas de ar engolidas pela tomada (ensaioT1_Q3,2_S/D1)

(Fonte: foto do autor)

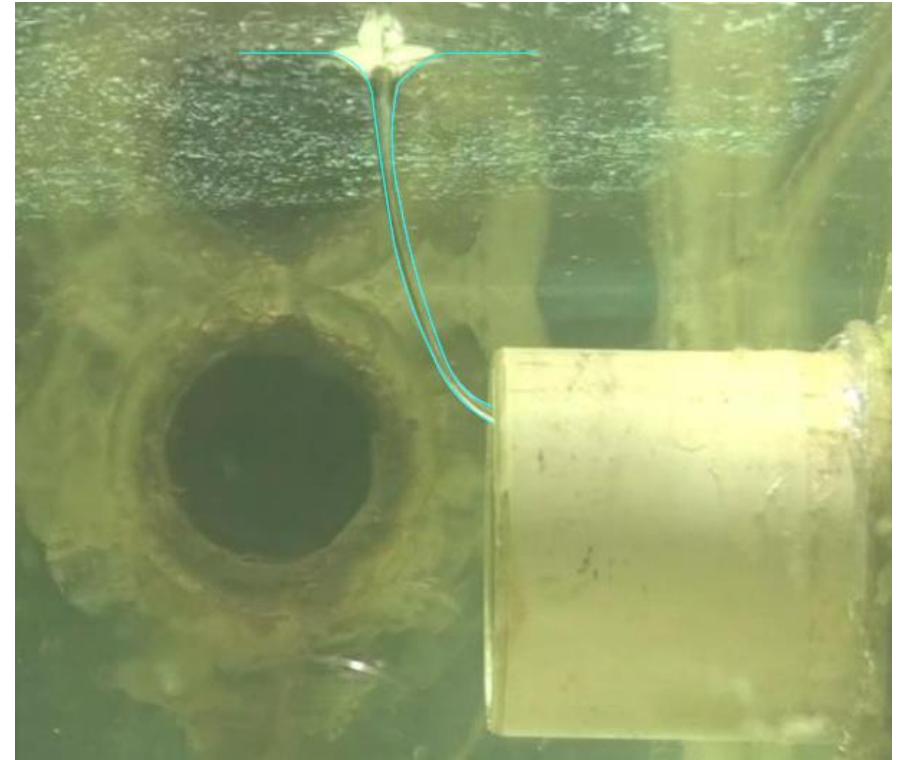


Figura 30 - Núcleo desenvolvido da superfície até a tomada (ensaioT1_Q3,2_S/D1)

(Fonte: foto do autor)

Esta divisão por faixas na intensidade dos vórtices pode-se visualizar na Figura 31, que ilustra esquematicamente como as regiões foram definidas nos ensaios realizados, para tomadas com reentrância de 0D, 0,5D, 1D e 1,5D.

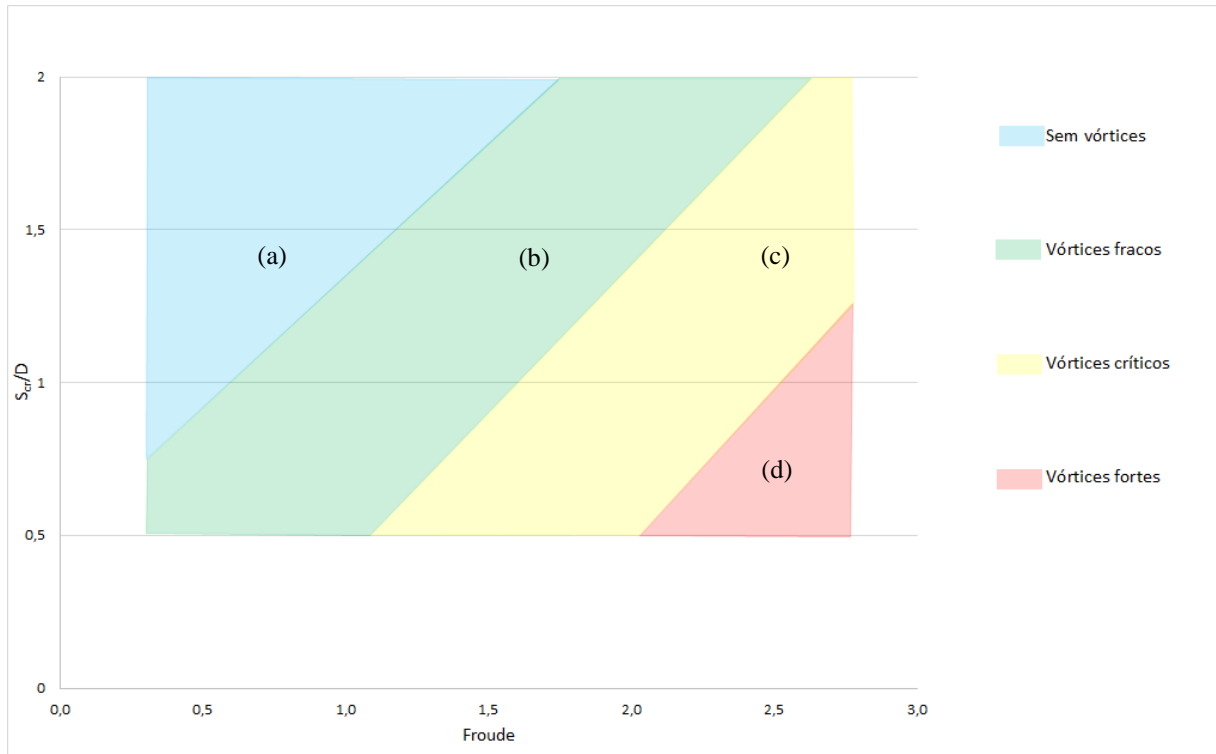


Figura 31 - Regiões definidas para os tipos de vórtice com as respectivas intensidades (a) sem vórtice, (b) vórtices fracos e (c) vórtices fortes

(Fonte: elaborado pelo autor)

São limitações do modelo:

- a) a submersão da tomada de água varia entre 0 e 2 diâmetros da tomada;
- b) o diâmetro nominal da tomada de água é de 50 mm;
- c) a vazão varia entre 0,4 e 4,0 l/s;
- d) número de Froude no conduto variando entre 0,31 e 3,08
- e) número de Reynolds no conduto variando entre 10311,93 e 103119,28
- f) número de Weber no conduto variando entre 30,46 e 3045,52

5 ANÁLISE DE DADOS

O objetivo da pesquisa é investigar as condições para formação de vórtices com arraste de ar na tomada de água do modelo experimental através de ensaios de laboratório. Verificando a influência da variação de vazão, submersão e distância da tomada de água até a parede do reservatório neste fenômeno. Portanto este capítulo se destina a apresentar os resultados da pesquisa.

5.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS PARA A TOMADA DE ÁGUA SEM REENTRÂNCIA

Os resultados dos ensaios realizados no modelo experimental para tomada de água sem reentrância, 0D, são apresentados na figura 32, que traz a variação do número adimensional S/D , submersão dividido pelo diâmetro da tomada, em relação ao número de Froude.

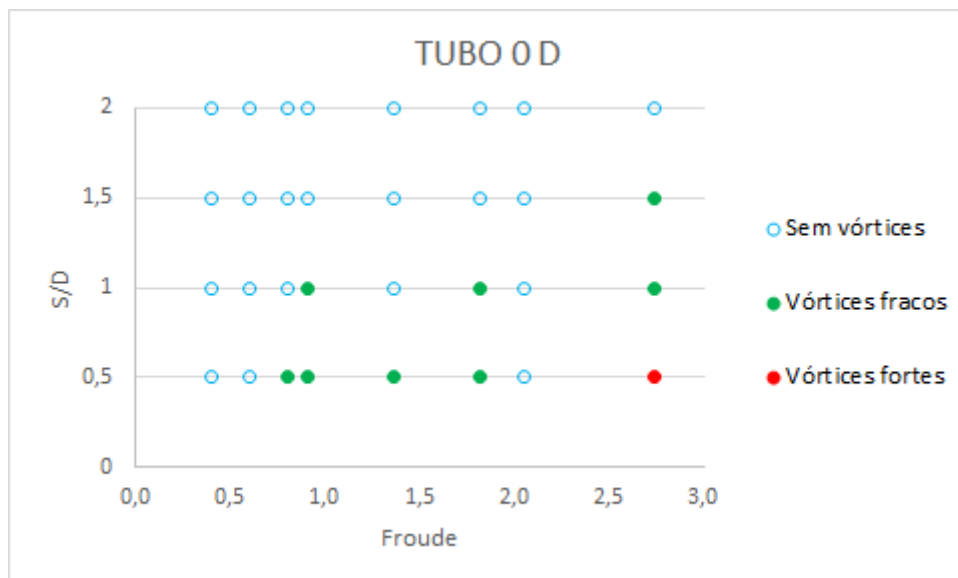


Figura 32–Resultado do ensaio para reentrância 0D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Com os dados obtidos no ensaio aplicou-se a metodologia proposta de identificação das regiões de intensidade dos vórtices, conforme apresenta a Figura 33.

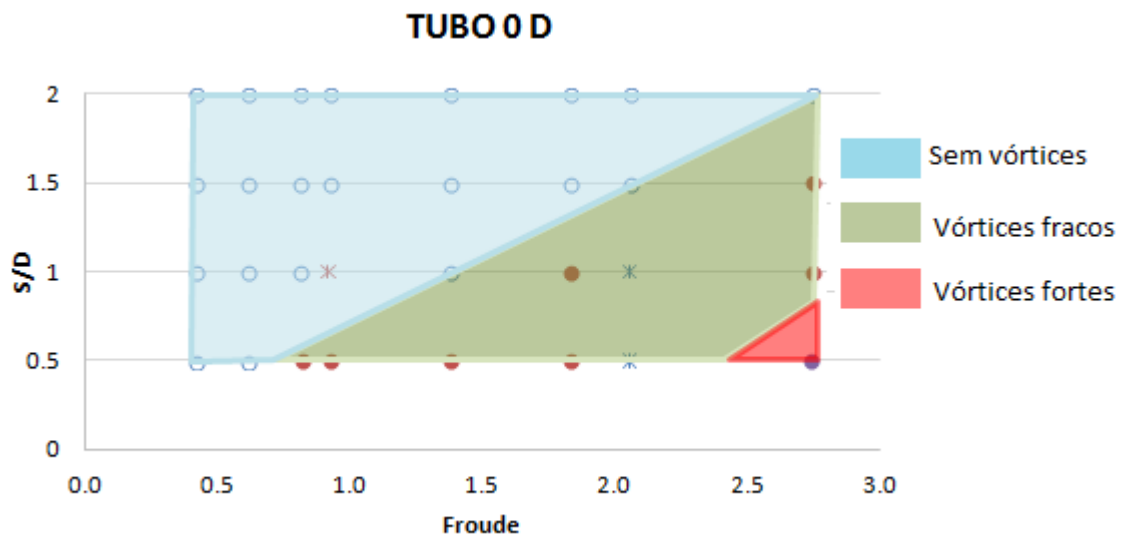


Figura 33 -Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Para o intervalo em análise, nota-se a predominância da região onde não há presença de vórtices. Ainda pode-se salientar que não se percebe a região de ocorrência dos vórtices críticos, com a intensidade dos vórtices verificados passando da região incipiente diretamente para a situação de bloqueio.

Ficou constatado durante a observação dos ensaios que a parede do reservatório é um inibidor para a formação de vórtices, pois pela sua proximidade da tomada, o movimento de rotação que se iniciava ao se chocar com a parede logo perdia sua intensidade.

Devido a metodologia utilizada pode-se identificar que, em certas situações, as condições para formação dos vórtices não seguem uma tendência de aumento da intensidade, podendo-se explicar esta observação pela maneira em que se identifica o vórtice predominante, não sendo o de maior risco a estrutura e sim o de maior permanência no tempo de ensaio.

Após uma análise isolada dos resultados para a condição de tomada de água junto a parede, foram analisados os dados de maneira comparativa aos autores referidos no Quadro 2. A Figura 34 apresenta esta comparação.

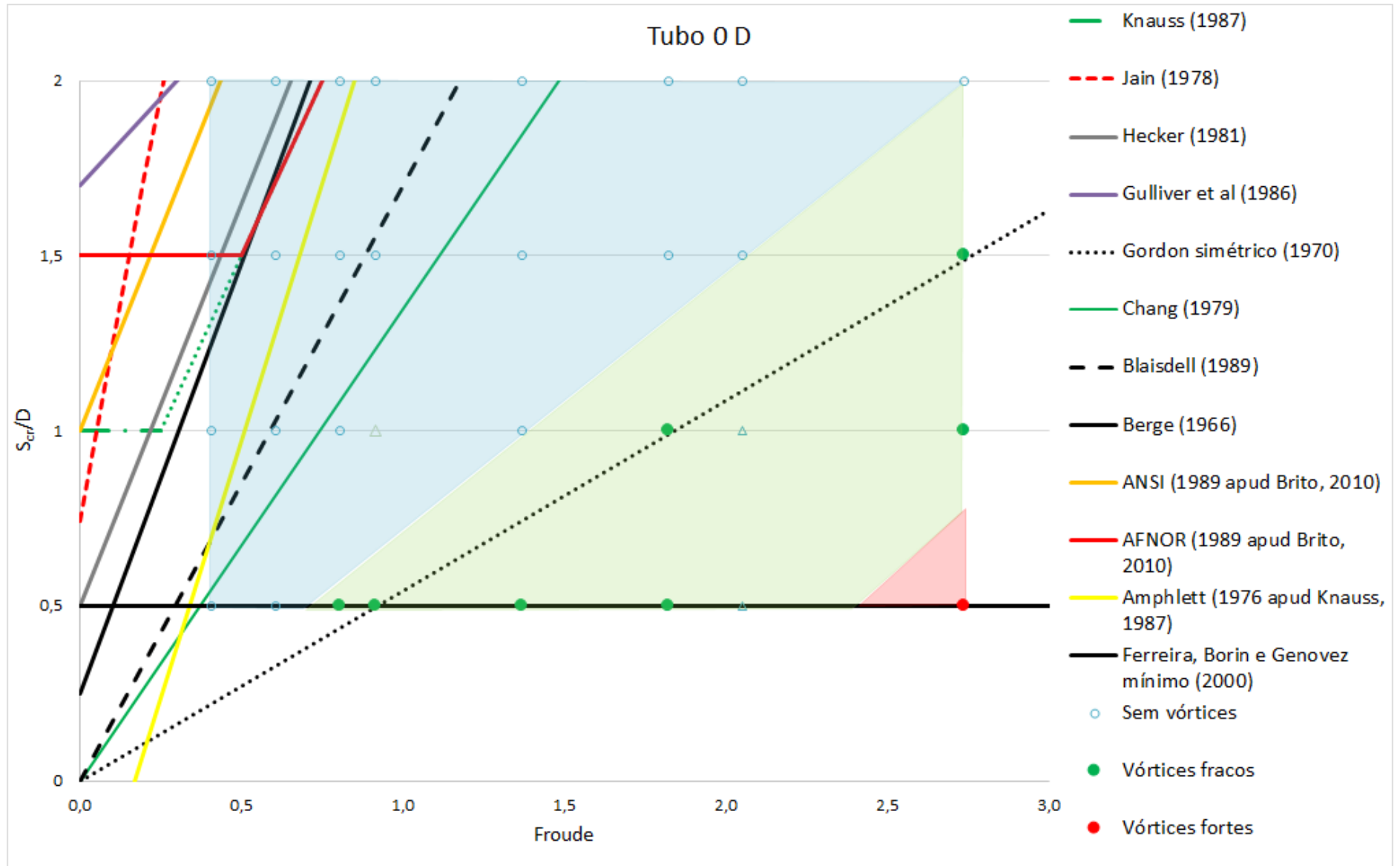


Figura 34 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0D comparadas à bibliografia
Análise da Ocorrência de Vórtices em Tomadas de Água Horizontais Simétricas

Conforme apresentado na Figura 34, podemos constatar que as curvas propostas pelos autores: AFNOR (1989 apud Brito, 2010), ANSI (1989 apud Brito, 2010), Amphlet (1976 apud Knauss, 1987), Berge (1966), Blaisdell (1989), Chang (1979), Gulliver et al (1986), Jain (1978), Ferreira, Borin e Genovez (2000), Hecker (1981) e Knauss (1987) são muito conservadoras se comparadas com a situação deste ensaio, pois, a situação limite para a submergência crítica indicada se encontra na região onde não há formação de vórtices. Já a curva sugerida por Gordon(1970) está mais próxima da fronteira onde inicia a região dos vórtices fracos, porém ainda seria inviável para utilização em um dimensionamento para cálculo da situação de submergência crítica.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS PARA A TOMADA DE ÁGUA COM REENTRÂNCIA DE 0,5 DIÂMETROS

Da mesma forma que para posição da tomada junto à parede, os resultados obtidos no modelo experimental para tomada com reentrância de 0,5D, apresentam a classificação dos vórtices segundo sua intensidade e estão apresentados em função do Número de Froude em relação ao número adimensional, S/D. A Figura 35 apresenta a intensidade dos vórtices para esta situação.

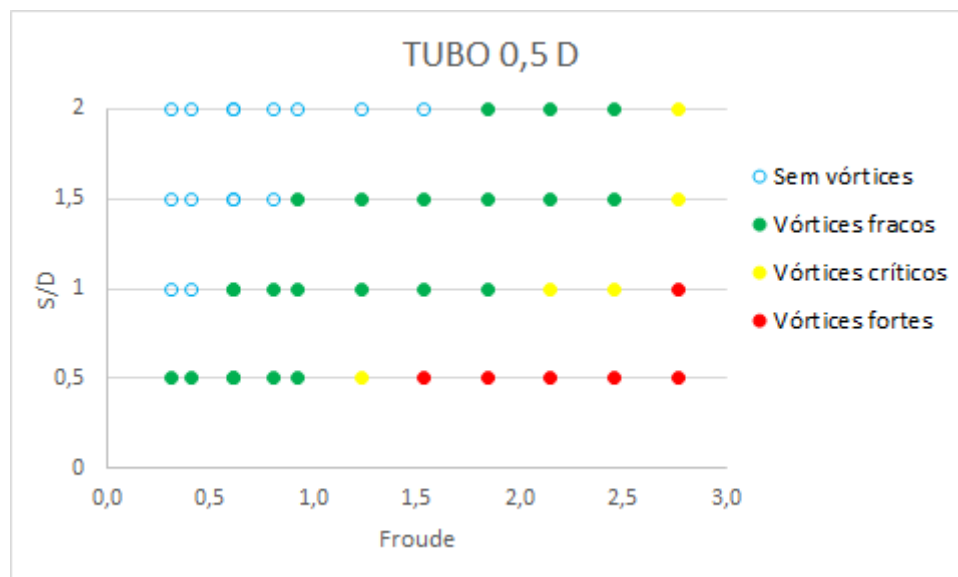


Figura 35 -Resultado do ensaio para reentrância 0,5 D

(Fonte: elaborado pelo autor)

A partir dos dados coletados no ensaio aplicou-se a metodologia proposta de identificação das regiões de intensidade dos vórtices, conforme apresenta a Figura 36.

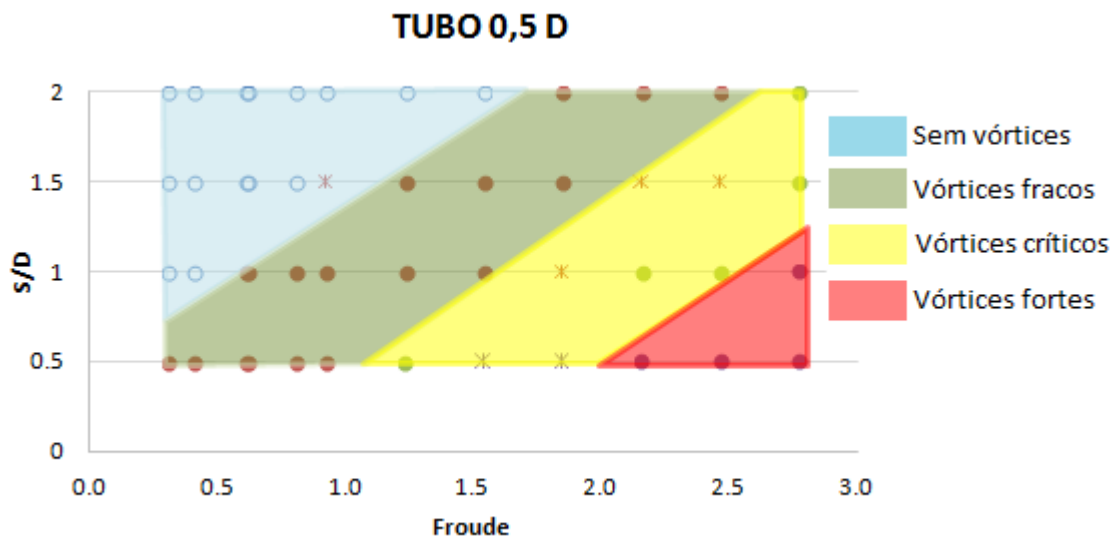


Figura 36 -Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0,5 D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Para os ensaios realizados com reentrância de 0,5 diâmetros, pode-se notar a existência das quatro regiões de intensidade com uma certa uniformidade entre as áreas. Ainda que tenha aumentado a região de vórtices de bloqueio, esta região ainda está em um número de Froude elevado e baixa submergência, o que mostra uma grande faixa de operação do modelo em segurança.

Após a análise isolada dos resultados, para a condição de tomada de água a 0,5 D, estes foram comparados aos dados dos autores referidos no Quadro 2. A Figura 37 apresenta esta comparação.

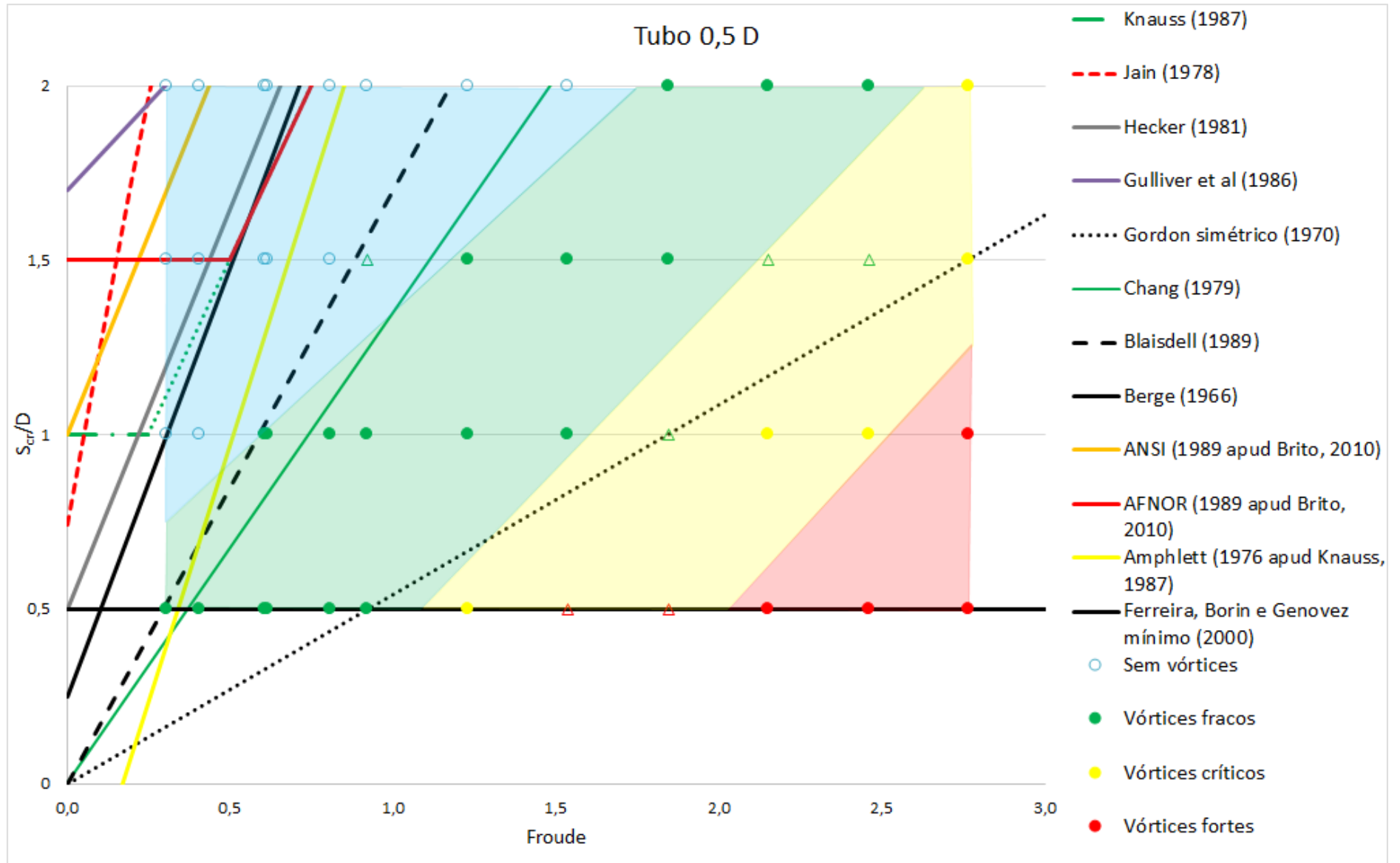


Figura 37 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 0,5 D comparadas à bibliografia

Conforme apresentado na Figura 37, pode-se notar que comparando as condições ensaiadas e as curvas propostas por AFNOR (1989 apud Brito, 2010), ANSI (1989 apud Brito, 2010), Gulliver et al (1986), Ferreira, Borin e Genovez (2000) e Jain (1978) seguem na área sem formação de vórtices. As curvas propostas por Amphlet (1976 apud Knauss, 1987), Berg (1966) e Blaisdell (1989) para baixa submergência estão na divisa entre a região sem vórtices e a de vórtices incipientes e a proposta por Chang (1979) está sobre este limite. Todas as curvas propostas teriam uma proposta onerosa demais se fossem utilizadas para dimensionar uma estrutura com estas características. Já a curva proposta por Gordon (1970) está sobre a zona de vórtices críticos em uma zona de transição para área de vórtices de bloqueio, esta opção já seria mais viável de execução.

5.3 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS PARA A TOMADA DE ÁGUA COM REENTRÂNCIA DE 1,0 DIÂMETRO

Como os resultados apresentados anteriormente os dados obtidos no modelo experimental para tomada de água com reentrância de 1 D, podem ser visualizados na Figura 38.

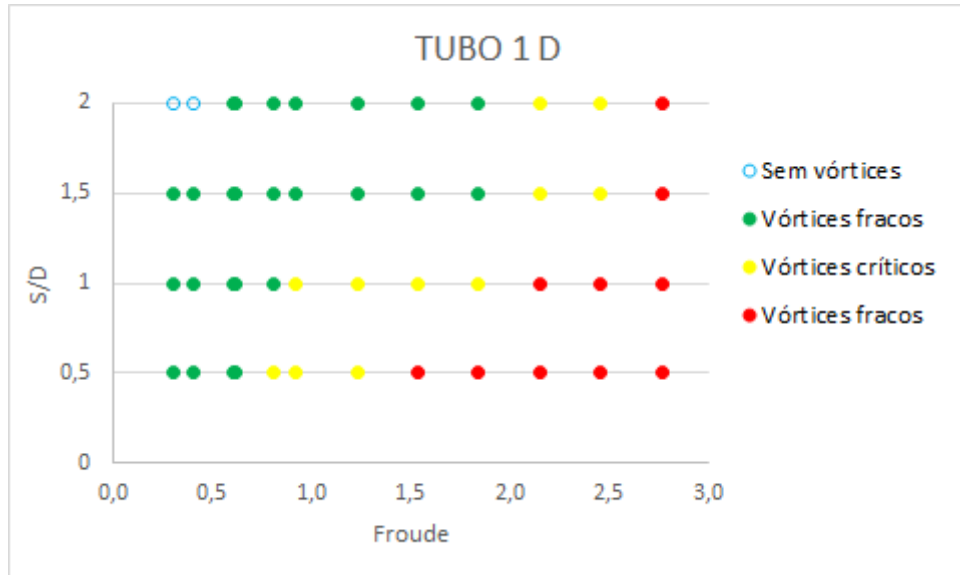


Figura 38 -Resultado do ensaio para reentrância 1 D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Com os dados coletados no ensaio, aplicou-se a metodologia proposta no capítulo anterior, conforme apresenta a Figura 39.

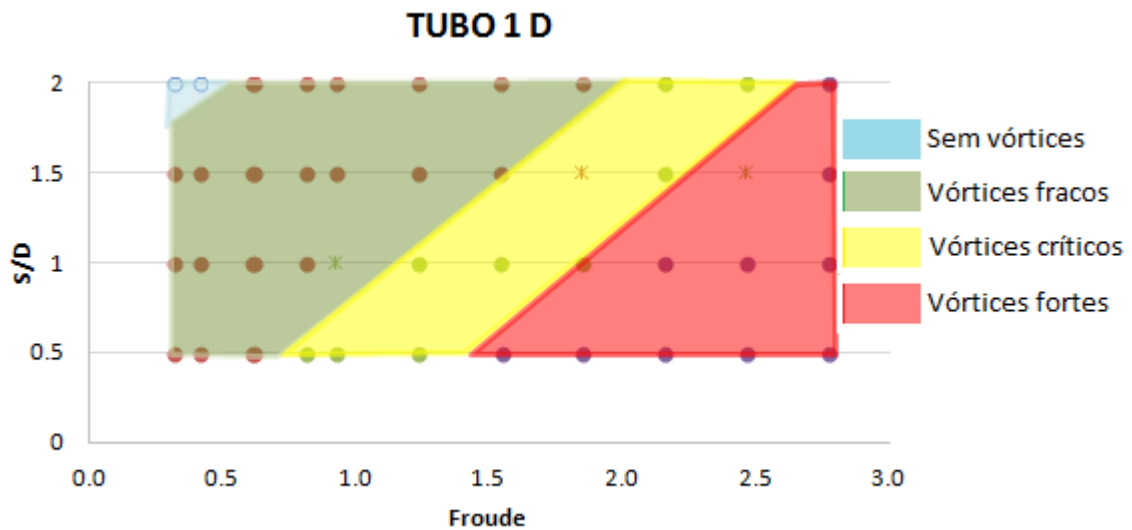


Figura 39 -Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Para os ensaios realizados com reentrância de 1 D, nota-se aumento na intensidade dos vórtices. A região referente aos ensaios sem o aparecimento dos vórtices diminuiu consideravelmente, enquanto a região dos vórtices de bloqueio aumentou. Esta situação já era esperada devido a estudos verificados na fase de revisão bibliográfica como o de Sarkardeh et al (2010).

Após análise isolada dos resultados para a condição de tomada de água a 1 D, os dados foram analisados de maneira comparativa aos autores referidos no Quadro 2. A Figura 40 apresenta esta comparação.

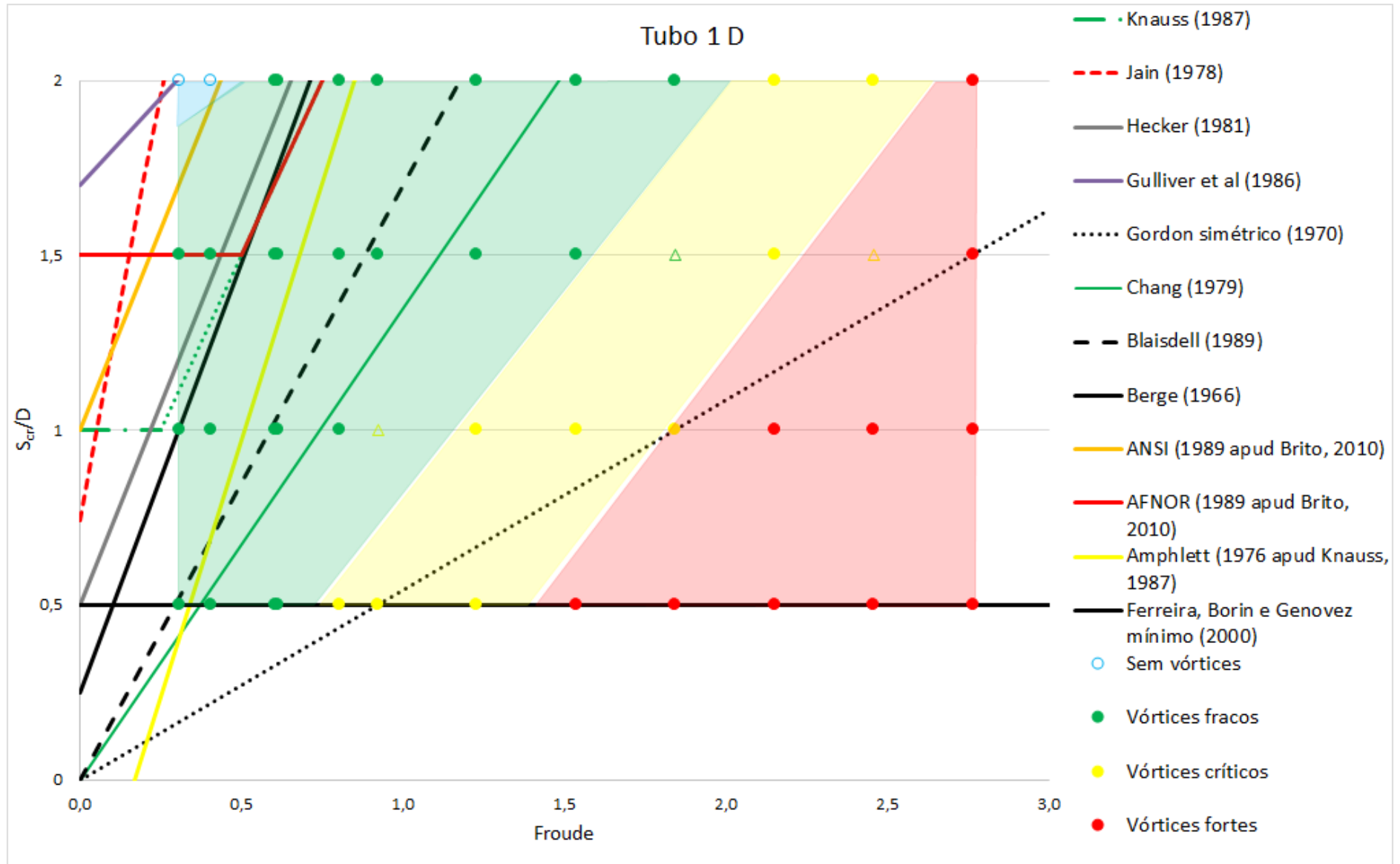


Figura 40 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1 D comparadas à bibliografia
Análise da Ocorrência de Vórtices em Tomadas de Água Horizontais Simétricas

Conforme apresentado na Figura 40, pode-se notar que as curvas propostas por ANSI (1989 apud Brito, 2010), Ferreira, Borin e Genovez (2000), Gulliveret al (1986) e Jain (1978) seguem fora da região com presença de vórtices, enquanto AFNOR (1989 apud Brito, 2010), Amphlet (1976 apud Knauss, 1987), Berge (1966), Blaisdell (1989), Knauss (1987) e Hecker (1981) estão na zona de vórtices fracos, a curva proposta por Chang (1979) está na área de transição entre os vórtices fracos e críticos. A curva proposta por Gordon (1970) para este caso subestima a intensidade dos vórtices a partir da submergência de um diâmetro. Logo para esta situação as curvas sugeridas não seriam indicadas para uso, pois ou são muito conservadoras, ou não abrangem toda a área ensaiada com a segurança necessária.

5.4 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS PARA A TOMADA DE ÁGUA COM REENTRÂNCIA DE 1,5 DIÂMETROS

Da mesma forma que os resultados apresentados anteriormente os dados obtidos no modelo experimental para tomada de água com reentrância de 1,5 D, apresentam a classificação dos vórtices segundo sua intensidade e estão apresentados em função do Número de Froude em relação às submergências ensaiadas. A Figura 41 apresenta a intensidade dos vórtices para a situação de 1,5 D.

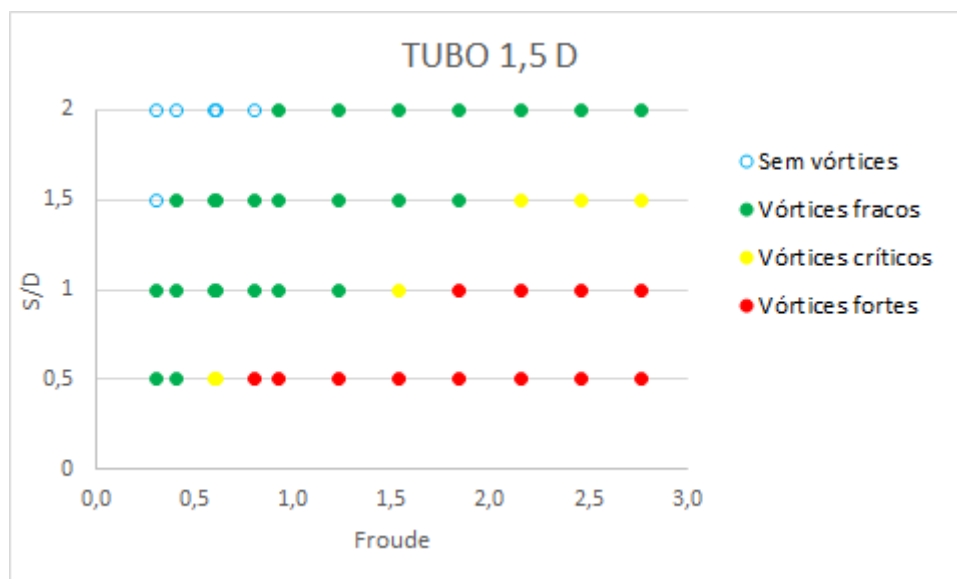


Figura 41 -Resultado do ensaio para reentrância 1,5 D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Partindo dos dados coletados no ensaio, aplicou-se a metodologia proposta, conforme apresenta a Figura 42.

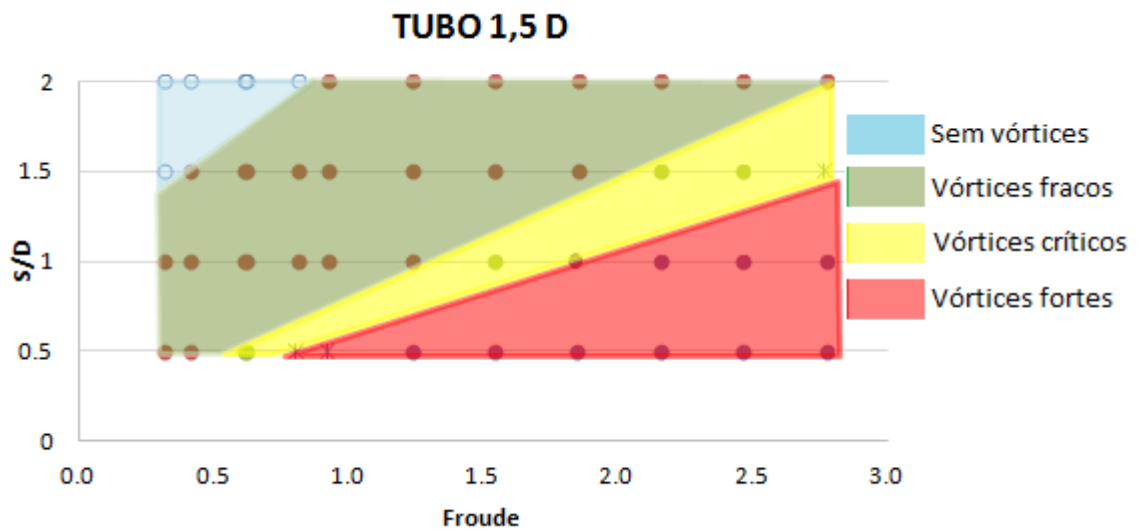


Figura 42 -Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1,5D

(Fonte: elaborado pelo autor)

Para os ensaios realizados com reentrância de 1,5 D, nota-se uma alteração na declividade nas zonas de transição entre as áreas, com a intensidade dos vórtices aumentando para submersão baixa e diminuindo para submersão alta.

Após análise isolada dos resultados para a condição de tomada de água a 1,5 D, os dados foram analisados de maneira comparativa aos autores referidos no Quadro 2. A Figura 43 apresenta esta comparação.

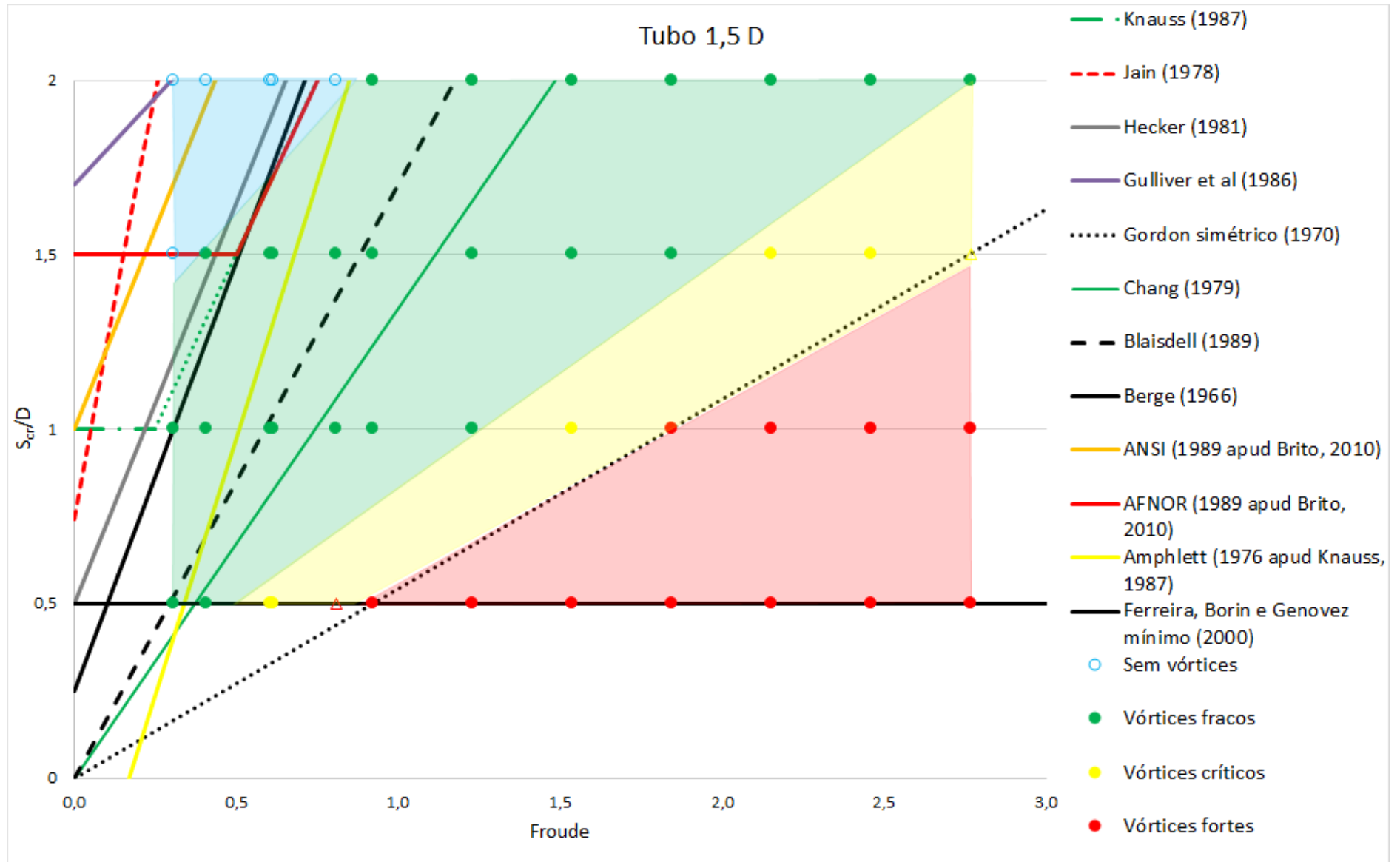


Figura 43 - Regiões de intensidade dos vórtices para o ensaio com reentrância 1,5 D comparadas à bibliografia

Conforme pode-se notar na Figura 43, as curvas propostas por ANSI (1989 apud Brito, 2010), Ferreira, Borin e Genovez (2000), Gulliver et al (1986) e Jain (1978) estão na zona onde não há presença de vórtices. Enquanto a proposta de submergência crítica de AFNOR (1989 apud Brito, 2010), Amphlet (1976 apud Knauss, 1987), Berge (1966), Hecker (1981) e Knauss (1987) é conservadora nesta situação pois sua curva está próxima a região onde iniciam os vórtices fracos. As propostas de Blaisdell (1989) e Chang (1979) estão na zona de transição entre os vórtices fracos e os críticos, mesmo assim todas elas seriam projetos superdimensionados. Já a proposta de Gordon (1970) para esta condições seria a proposta ideal de curva para dimensionamento da submergência crítica.

5.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA AS TOMADAS DE 0D, 0,5D, 1D E 1,5D

Nas Figuras 33, 36, 39 e 42 foram apresentadas as regiões de intensidade dos vórtices e nelas pode-se notar a variação das áreas, quando se altera a distância da entrada da tomada de água à parede do reservatório. As figuras 44, 45 e 46 mostram as faixas de transição, onde há troca na intensidade dos vórtices, conforme os ensaios realizados.

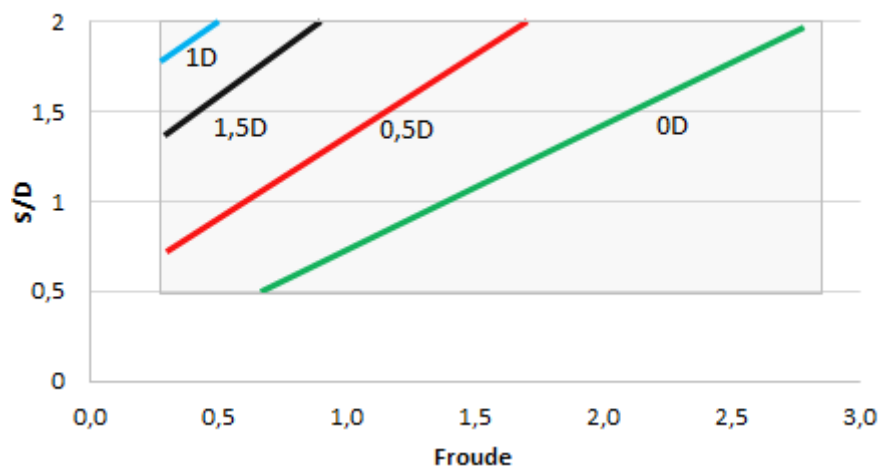


Figura 44–Zona de transição para vórtices de intensidade 1

(Fonte: elaborado pelo autor)

A figura 44 apresenta a evolução das zonas de transição da situação sem vórtices para a região de vórtices incipientes, analisando a figura nota-se certa evolução para os ensaios 0D e 0,5D, com regressão da área sem vórtices a partir da ampliação da distância à parede. Já as curvas para 1D e 1,5D não seguem a mesma tendência, estima-se que para estas distâncias exista uma zona de transição onde a distância à parede já não tenha tanta interferência na formação de vórtices.

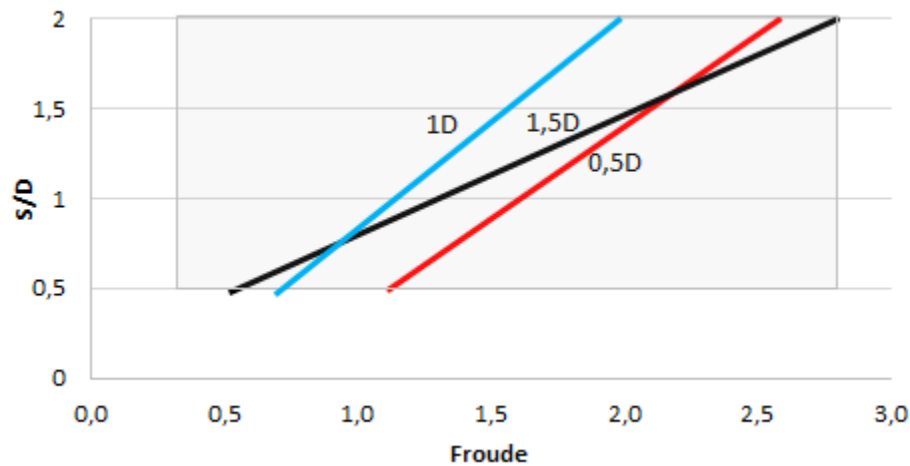


Figura 45–Zona de transição para vórtices de intensidade 2

(Fonte: elaborado pelo autor)

A figura 45 apresenta a evolução das zonas de transição da situação de vórtices fracos para a região de vórtices críticos, nos ensaios realizados com a tomada junto a parede, 0D, não foram observados vórtices críticos, daí a inexistência de curva para 0D. Para estes ensaios, as curvas 0,5D e 1D seguem a tendência de quanto mais distante da parede mais propício a formação de vórtices é o escoamento. Já na curva para os ensaios com 1,5D, na submergência S/D 0,5 se mantém esta tendência, porém, com o aumento do nível da água este movimento não se confirma e a zona de transição se confunde com a dos outros ensaios.

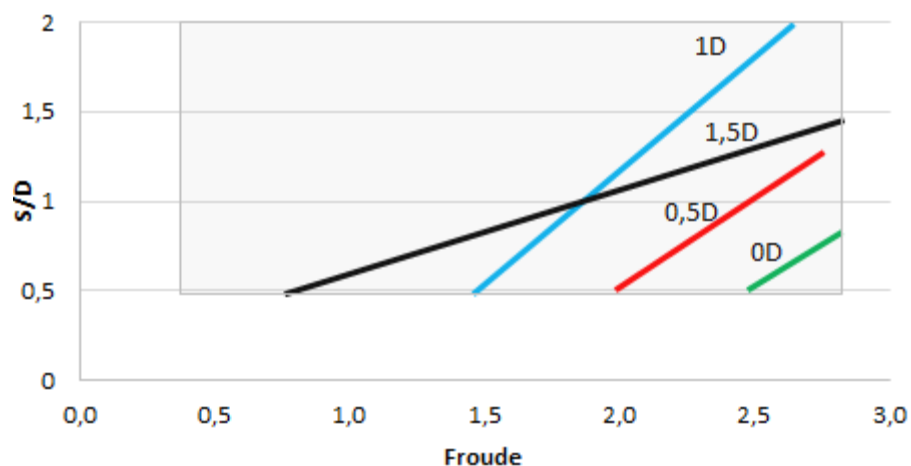


Figura 46–Zona de transição para vórtices de intensidade 3

(Fonte: elaborado pelo autor)

A Figura 46 representa a zona de transição entre os vórtices críticos e os fortes, nela observam-se as três regiões de transição dos vórtices e a tendência de aumento da distância à parede juntamente com a intensidade dos vórtices. A exemplo do caso anterior a curva para 1,5D tem início seguindo esta tendência e depois muda sua declividade alterando esta

tendência de crescimento. A partir destas comparações nota-se que entre as distâncias de $1D$ a $1,5D$ da tomada à parede, deve existir uma zona de transição onde as condições para formação de vórtices não seguem o mesmo comportamento apresentado, com o aumento de sua intensidade sendo proporcional à distância da parede.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da comparação das curvas sugeridas pela bibliografia, para encontrar um nível seguro de operação para as tomadas de água, identifica-se que cada autor utiliza critérios diferentes de análise do tipo de vórtices, o que inviabiliza a composição de um critério único para cálculo da submergência crítica.

As condições do escoamento para a formação dos vórtices são dinâmicas e intermitentes, mesmo em condições de escoamento constante no modelo (vazão e submergência) e características físicas da tomada sem alteração (diâmetro e distância da parede) a frequência, a intensidade e o tamanho dos vórtices variam. Esta condição instável é consequência do tipo de escoamento (rotacional) e de fenômenos de difícil medição como dissipações locais de energia e turbulência, que acabam por modificar as condições de aproximação alterando o seu comportamento hidráulico.

6 CONCLUSÕES

A pesquisa realizada procurou identificar as condições de escoamento para formação de vórtices em uma tomada de água através de uma abordagem experimental, realizando ensaios em um modelo genérico de tomada de água com captação horizontal e aproximação simétrica, comparando estes resultados com os de pesquisas similares, através da identificação e delimitação de regiões de intensidade dos vórtices.

A grande diferença encontrada na declividade das curvas propostas pelos autores estudados no cálculo da submergência crítica, evidenciou que o escoamento para formação de vórtices em tomadas de água se trata de um fenômeno que necessita de maiores estudos para o seu melhor entendimento. Nota-se a necessidade de uniformizar a metodologia de classificação do tipo de vórtice que ainda é subjetiva. Durante a pesquisa foi sugerida uma classificação simplificada para avaliação da intensidade dos vórtices, afim de eliminar parte da subjetividade presente na sua análise.

A variação da reentrância da tomada de água permitiu identificar que para as mesmas condições de ensaio esta distância influencia no comportamento do escoamento, favorecendo a formação de vórtices e amplificando a sua intensidade. Assim, visando impedir a formação de vórtices com entrada de ar deve-se projetar a tomada junto à parede. Sendo o ideal que não exista saliência no tubo em relação à parede ($L/D=0$). Pois quando o vórtice se forma, ele entra em contato com a parede e perde intensidade, muitas vezes se dissipando totalmente. Ficou constatado na pesquisa que a partir da reentrância $L/D>0,5$ a tendência de formação de vórtices é a mesma, assim, a partir desta distância não há mais influência da saliência da tomada na formação dos vórtices.

Para a situação de maior risco analisada, $S/D=0,5$, submergência que apresenta com maior frequência e maior intensidade os vórtices fortes, pode-se constatar que o comportamento dos vórtices é linear, ou seja, para todas as reentrâncias analisadas a intensidade dos vórtices foi aumentando conforme se aumentou o número de Froude (vazão), apresentando um avanço gradual da zona referente aos vórtices fortes, como nota-se a seguir:

- $L=0D$, início da região de vórtices fortes em aproximadamente $Fr=2,5$;
- $L=0,5D$, início da região de vórtices fortes em aproximadamente $Fr=1,8$;

- $L=1D$, início da região de vórtices fortes em aproximadamente $Fr=1,4$;
- $L=1,5D$, início da região de vórtices fortes em aproximadamente $Fr=0,9$;

A alteração de parâmetros como submergência, vazão e reentrância da tomada, indicaram que qualquer variação destes itens influencia na dinâmica do escoamento. Assim, o aumento da vazão de descarga (aumento do número de Froude), o aumento da distância da tomada à parede (aumento da reentrância) e a redução da submergência são fatores que colaboram para a formação de vórtices com arraste de ar.

Uma das partes mais importantes da pesquisa é a observação e análise da intensidade dos vórtices. Como o fenômeno de formação dos vórtices é dinâmico, inúmeras vezes a intensidade dos vórtices é observada e não é somada a contagem de tempo, pois sua aparição foi efêmera, subestimando a classificação da intensidade do vórtice para esta situação.

Outra discussão importante é acerca do método de avaliação do vórtice predominante, em alguns ensaios o vórtice com intensidade predominante não é a situação de maior risco para a estrutura, com a existência de intensidades maiores, porém em uma escala temporal menor.

7 RECOMENDAÇÕES

A pesquisa realizada aqui não teve como objetivo esgotar todas as possibilidades de estudo sobre este assunto, assim, conforme se identificou situações relevantes e esta pesquisa não teria condições de alcance, estas ficaram como sugestão para possíveis futuros estudos:

- a) utilização de tubos com espaçamento menores, entre $0,5D$ e $1,5D$, para identificar a que distância da tomada à parede essa não influencia o escoamento;
- b) repetição dos ensaios em um modelo três vezes maior;
- c) alterar a geometria da tomada;
- d) medir a influência da altura da tomada ao fundo;
- e) medir a influência da distância da tomada a parede lateral;
- f) analisar condições de aproximação assimétricas;
- g) comparação destes dados com modelo numérico;
- h) análise dos dados a partir da classificação direta do tipo de vórtice, ou seja, classificação das condições de ensaio pelo vórtice de maior intensidade observado não interessando seu tempo de permanência.

REFERÊNCIAS

- ANWAR, H. O. Formation of a weak vortex. **Journal of Hydraulic Research**, v. 4, n. 1, p. 1-16, 1966.
- ANWAR, H. O.; WELLER, J. A.; AMPHLETT, M. B. Similarity of free-vortex formations at horizontal intake. **Journal of Hydraulic Research**, v. 16, n. 2, p. 95-105, 1978.
- AOKI, C. M. Condições de semelhança na formação de vórtices em tomadas d'água. **Boletim Técnico do Departamento de Águas e Energia Elétrica**, São Paulo, v. 5, n. 2, p. 129-153, maio/ago. 1982.
- BLAISDELL, F. W. Discussion of Weak Vortices at Vertical Intakes by John S. Gulliver and Alan J. Rindels (v. 113, n.9, Sept. 1989). **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 5, p. 703-706, 1989.
- BERGE, J. P. **A study of Vortex Formation and Other Abnormal Flow in a Tank with and without a Free Surface**. La Houille Blanche, 1966.
- BRITO, M. G. de. **Simulação numérica de tomadas de água**. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.
- CASAMASSA NETO, J. **Vórtices**. 1991. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.
- CHANG, E. **Experimental Data on the Hydraulic Design of Intakes and Rectangular Pump Sumps**. The British Hydromechanics Research Association, 1979.
- DAGGETT, L. L.; KEULEGAN, G. H. Similitude in Free Surface Vortex Formation. **Journal of Hydraulic Division**. Vol. 100, n.11, p. 1565 – 158, nov. 1974.
- ELETROBRÁS. **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Eletrobrás, 2003.
- ESHA. **Guide on How to Develop a Small Hydropower Plant**. ESHA, 2004.
- FERREIRA, L. M. C. **Submergência Crítica na Formação de Vórtices em Tomadas D'água Verticais**. 2001. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Comissão de Pós-Graduação, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP, 2001.
- FERREIRA, L. M. C.; BORIN, D.; GENOVEZ, A. I. B. Submergência Crítica na Formação de Vórtices em Tomadas D'água Verticais. **XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica**, Tomo II, p. 673-680. Córdoba, 22 al 27 oct, 2000.
- FERREIRA, L. M. C.; 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, 2001.

FERREIRA, L. M. C.; GENOVEZ, A. I. B. Submergência Mínima em Tomadas D'água Verticais. **Ingenieria del Agua**, v. 12, n. 2, p.107-115, Jun. 2005.

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

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

HECKER, G. E. Model-Prototype comparison on free surface vortices. **Journal of Hydraulic Division**, v. 107, n. 10, p. 1243-1259, Oct. 1981.

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

KLEYNHANS, S.H. **Physical Hydraulic Model Investigation of Critical Submergence for Raised Pump Intakes**. 2012. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Stellenbosch, África do Sul, 2012.

KNAUSS, J. **SwirlingFlow Problems at Intakes**. Rotterdam: Balkema, 1987.

MÖLLER, G. **Vortex-Induced Air Entrainment Rate at Intakes**. Mitteilungen 220, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 2013.

PADMANABHAN, M.; HECKER, G. E. Scale effects in pump sump models. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 110, n. 11, p. 1540-1556, 1983.

SARKARDEH, H.; Zarrati, A. R.; Roshan, R. Effect of Intake Head Wall and Trash Rack on Vortices. **Journal of Hydraulic Engineering**. Vol 48, No. 1, 108 - 112. 2010.

SCHREIBER, G. P. **Usinas Hidrelétricas**. São Paulo: Edgar Bluncher, Rio de Janeiro 1977.

SILVA, S. P. V. **Estudo Numérico-Experimental da Tomada de Água da Barragem de Foz Tua**. 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Aveiro, Pt, 2012.

TSUTIYA, M. T. Reservatório de distribuição de água: principais aspectos hidráulicos relacionados com a saída de água. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**.II – 012, p. 1096 – 1107. 1997.

YILDIRIM, N., KOCABAS, F. Critical Submergence for Intakes in Still Water Reservoir. **Journal of Hydraulic Engineering**, Vol. 124, n.1, p. 103-104, jan. 1998.

ANEXO A – Tabela com o resultado dos ensaios

Ensaio para o tubo a OD

Tubo	S/D	Q l/s	Tipo de Vórtice	Velocidade m/s	Froude
0	0.5	0.53	0	0.282	0.408
0	0.5	0.79	0	0.421	0.607
0	0.5	1.05	1	0.559	0.807
0	0.5	1.19	1	0.634	0.915
0	0.5	1.78	1	0.948	1.369
0	0.5	2.37	1	1.262	1.822
0	0.5	2.67	0	1.422	2.053
0	0.5	3.56	3	1.896	2.737
0	1	0.53	0	0.282	0.408
0	1	0.79	0	0.421	0.607
0	1	1.05	0	0.559	0.807
0	1	1.19	1	0.634	0.915
0	1	1.78	0	0.948	1.369
0	1	2.37	1	1.262	1.822
0	1	2.67	0	1.422	2.053
0	1	3.56	1	1.896	2.737
0	1.5	0.53	0	0.282	0.408
0	1.5	0.79	0	0.421	0.607
0	1.5	1.05	0	0.559	0.807
0	1.5	1.19	0	0.634	0.915
0	1.5	1.78	0	0.948	1.369
0	1.5	2.37	0	1.262	1.822
0	1.5	2.67	0	1.422	2.053
0	1.5	3.56	1	1.896	2.737
0	2	0.53	0	0.282	0.408
0	2	0.79	0	0.421	0.607
0	2	1.05	0	0.559	0.807
0	2	1.19	0	0.634	0.915
0	2	1.78	0	0.948	1.369
0	2	2.37	0	1.262	1.822
0	2	2.67	0	1.422	2.053
0	2	3.56	0	1.896	2.737

Ensaio para o tubo a 0,5D

Tubo	S/D	Q l/s	Tipo de Vórtice	Velocidade m/s	Froude
0.5	0.5	0.4	1	0.213	0.308
0.5	0.5	0.53	1	0.282	0.408
0.5	0.5	0.79	1	0.421	0.607
0.5	0.5	0.8	1	0.426	0.615
0.5	0.5	1.05	1	0.559	0.807
0.5	0.5	1.2	1	0.639	0.923
0.5	0.5	1.6	2	0.852	1.230
0.5	0.5	2	3	1.065	1.538
0.5	0.5	2.4	3	1.278	1.845
0.5	0.5	2.8	3	1.491	2.153
0.5	0.5	3.2	3	1.704	2.461
0.5	0.5	3.6	3	1.917	2.768
0.5	0.5	4	3	2.130	3.076
0.5	1	0.4	0	0.213	0.308
0.5	1	0.53	0	0.282	0.408
0.5	1	0.79	1	0.421	0.607
0.5	1	0.8	1	0.426	0.615
0.5	1	1.05	1	0.559	0.807
0.5	1	1.2	1	0.639	0.923
0.5	1	1.6	1	0.852	1.230
0.5	1	2	1	1.065	1.538
0.5	1	2.4	1	1.278	1.845
0.5	1	2.8	2	1.491	2.153
0.5	1	3.2	2	1.704	2.461
0.5	1	3.6	3	1.917	2.768
0.5	1	4	3	2.130	3.076
0.5	1.5	0.4	0	0.213	0.308
0.5	1.5	0.53	0	0.282	0.408
0.5	1.5	0.79	0	0.421	0.607
0.5	1.5	0.8	0	0.426	0.615
0.5	1.5	1.05	0	0.559	0.807
0.5	1.5	1.2	1	0.639	0.923
0.5	1.5	1.6	1	0.852	1.230
0.5	1.5	2	1	1.065	1.538
0.5	1.5	2.4	1	1.278	1.845
0.5	1.5	2.8	1	1.491	2.153
0.5	1.5	3.2	1	1.704	2.461
0.5	1.5	3.6	2	1.917	2.768
0.5	1.5	4	2	2.130	3.076
0.5	2	0.4	0	0.213	0.308
0.5	2	0.53	0	0.282	0.408
0.5	2	0.79	0	0.421	0.607
0.5	2	0.8	0	0.426	0.615
0.5	2	1.05	0	0.559	0.807
0.5	2	1.2	0	0.639	0.923
0.5	2	1.6	0	0.852	1.230
0.5	2	2	0	1.065	1.538
0.5	2	2.4	1	1.278	1.845
0.5	2	2.8	1	1.491	2.153
0.5	2	3.2	1	1.704	2.461
0.5	2	3.6	2	1.917	2.768
0.5	2	4	2	2.130	3.076

Ensaio para o tubo a 1D

Tubo	S/D	Q l/s	Tipo de Vórtice	Velocidade m/s	Froude
1	0.5	0.4	1	0.213	0.308
1	0.5	0.53	1	0.282	0.408
1	0.5	0.79	1	0.421	0.607
1	0.5	0.8	1	0.426	0.615
1	0.5	1.05	2	0.559	0.807
1	0.5	1.2	2	0.639	0.923
1	0.5	1.6	2	0.852	1.230
1	0.5	2	3	1.065	1.538
1	0.5	2.4	3	1.278	1.845
1	0.5	2.8	3	1.491	2.153
1	0.5	3.2	3	1.704	2.461
1	0.5	3.6	3	1.917	2.768
1	0.5	4	3	2.130	3.076
1	1	0.4	1	0.213	0.308
1	1	0.53	1	0.282	0.408
1	1	0.79	1	0.421	0.607
1	1	0.8	1	0.426	0.615
1	1	1.05	1	0.559	0.807
1	1	1.2	2	0.639	0.923
1	1	1.6	2	0.852	1.230
1	1	2	2	1.065	1.538
1	1	2.4	2	1.278	1.845
1	1	2.8	3	1.491	2.153
1	1	3.2	3	1.704	2.461
1	1	3.6	3	1.917	2.768
1	1	4	3	2.130	3.076
1	1.5	0.4	1	0.213	0.308
1	1.5	0.53	1	0.282	0.408
1	1.5	0.79	1	0.421	0.607
1	1.5	0.8	1	0.426	0.615
1	1.5	1.05	1	0.559	0.807
1	1.5	1.2	1	0.639	0.923
1	1.5	1.6	1	0.852	1.230
1	1.5	2	1	1.065	1.538
1	1.5	2.4	1	1.278	1.845
1	1.5	2.8	2	1.491	2.153
1	1.5	3.2	2	1.704	2.461
1	1.5	3.6	3	1.917	2.768
1	1.5	4	3	2.130	3.076
1	2	0.4	0	0.213	0.308
1	2	0.53	0	0.282	0.408
1	2	0.79	1	0.421	0.607
1	2	0.8	1	0.426	0.615
1	2	1.05	1	0.559	0.807
1	2	1.2	1	0.639	0.923
1	2	1.6	1	0.852	1.230
1	2	2	1	1.065	1.538
1	2	2.4	1	1.278	1.845
1	2	2.8	2	1.491	2.153
1	2	3.2	2	1.704	2.461
1	2	3.6	3	1.917	2.768
1	2	4	3	2.130	3.076

Ensaio para o tubo a 1,5D

Tubo	S/D	Q l/s	Tipo de Vórtice	Velocidade m/s	Froude
1.5	0.5	0.4	1	0.213	0.308
1.5	0.5	0.53	1	0.282	0.408
1.5	0.5	0.79	2	0.421	0.607
1.5	0.5	0.8	2	0.426	0.615
1.5	0.5	1.05	3	0.559	0.807
1.5	0.5	1.2	3	0.639	0.923
1.5	0.5	1.6	3	0.852	1.230
1.5	0.5	2	3	1.065	1.538
1.5	0.5	2.4	3	1.278	1.845
1.5	0.5	2.8	3	1.491	2.153
1.5	0.5	3.2	3	1.704	2.461
1.5	0.5	3.6	3	1.917	2.768
1.5	0.5	4	3	2.130	3.076
1.5	1	0.4	1	0.213	0.308
1.5	1	0.53	1	0.282	0.408
1.5	1	0.79	1	0.421	0.607
1.5	1	0.8	1	0.426	0.615
1.5	1	1.05	1	0.559	0.807
1.5	1	1.2	1	0.639	0.923
1.5	1	1.6	1	0.852	1.230
1.5	1	2	2	1.065	1.538
1.5	1	2.4	3	1.278	1.845
1.5	1	2.8	3	1.491	2.153
1.5	1	3.2	3	1.704	2.461
1.5	1	3.6	3	1.917	2.768
1.5	1	4	3	2.130	3.076
1.5	1.5	0.4	0	0.213	0.308
1.5	1.5	0.53	1	0.282	0.408
1.5	1.5	0.79	1	0.421	0.607
1.5	1.5	0.8	1	0.426	0.615
1.5	1.5	1.05	1	0.559	0.807
1.5	1.5	1.2	1	0.639	0.923
1.5	1.5	1.6	1	0.852	1.230
1.5	1.5	2	1	1.065	1.538
1.5	1.5	2.4	1	1.278	1.845
1.5	1.5	2.8	2	1.491	2.153
1.5	1.5	3.2	2	1.704	2.461
1.5	1.5	3.6	2	1.917	2.768
1.5	1.5	4	2	2.130	3.076
1.5	2	0.4	0	0.213	0.308
1.5	2	0.53	0	0.282	0.408
1.5	2	0.79	0	0.421	0.607
1.5	2	0.8	0	0.426	0.615
1.5	2	1.05	0	0.559	0.807
1.5	2	1.2	1	0.639	0.923
1.5	2	1.6	1	0.852	1.230
1.5	2	2	1	1.065	1.538
1.5	2	2.4	1	1.278	1.845
1.5	2	2.8	1	1.491	2.153
1.5	2	3.2	1	1.704	2.461
1.5	2	3.6	1	1.917	2.768
1.5	2	4	1	2.130	3.076