

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

Alessandra Wagner Coimbra

**TOMADA D'ÁGUA VERTICAL: FORMAÇÃO DE VÓRTICES
EM MODELO EXPERIMENTAL**

Porto Alegre
dezembro 2013

ALESSANDRA WAGNER COIMBRA

**TOMADA D'ÁGUA VERTICAL: FORMAÇÃO DE VÓRTICES
EM MODELO EXPERIMENTAL**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Marcelo Giulian Marques

Porto Alegre
dezembro 2013

ALESSANDRA WAGNER COIMBRA

**TOMADAS D'ÁGUA: FORMAÇÃO DE VÓRTICES EM
MODELO EXPERIMENTAL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelo Professor Orientador e pela Coordenadora da disciplina Trabalho de Diplomação Engenharia Civil II (ENG01040) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, dezembro de 2013

Prof. Marcelo Giulian Marques
PhD pela Université Laval/Québec
Orientador

Profa. Carin Maria Schmitt
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA

Prof. Marcelo Giulian Marques (UFRGS)
PhD pela Université Laval/Québec

Prof. Maurício Dai Prá (UFPEL)
Dr. pela UFRGS

Eng. Mariane Kempka
Eng. pela UFRGS

Dedico este trabalho a meus pais, Nara Maria Wagner e Marco Aurélio Coimbra, que sempre me apoiaram e especialmente durante o período do meu Curso de Graduação estiveram ao meu lado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Marcelo Giulian Marques, orientador deste trabalho, pela paciência com as consultas e correções, além das indicações de material para pesquisa e como elaborar o trabalho.

Agradeço aos meus pais, Marco Aurélio Coimbra e Nara Maria Wagner, por toda dedicação, carinho e atenção que sempre tiveram comigo e pelo incentivo para que pudesse concluir esse trabalho.

Agradeço aos meus colegas e amigos, por estarem sempre ao meu lado me apoiando em todos os momentos sendo eles bons ou ruins.

Que os vossos esforços desafiem as impossibilidades,
lembrai-vos de que as grandes coisas do homem foram
conquistadas do que parecia impossível.

Charles Chaplin

RESUMO

Este trabalho versa sobre tomadas d'água verticais de usinas hidrelétricas estudadas em um modelo experimental do Laboratório de Obras Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Esse estudo visa compreender o comportamento do escoamento em torno de uma tomada d'água vertical com objetivo de determinar vazões e submergências que impeçam a formação de vórtices na mesma. A presença de escoamento com vorticidade pode trazer consequências prejudiciais, tais como, diminuição do rendimento de máquinas hidráulicas, diminuição da vazão e cavitação. Entre os principais parâmetros que influenciam a formação de vórtices estão a submergência crítica e a velocidade do escoamento no conduto forçado. Esses parâmetros dependem de fatores como diâmetro do conduto, ângulo de aproximação do escoamento e números de Reynolds e Weber. Para estabelecer as condições de escoamento nas quais não se tem formação de vórtices, foi feito um estudo experimental, usando um modelo físico com três tomadas d'água, duas horizontais (simétrica e assimétrica) e uma vertical (assimétrica), porém, utilizou-se apenas a tomada vertical assimétrica para os ensaios. Nesses ensaios variaram-se submergências e vazões a fim de estabelecer quais as situações mais críticas para formação de vórtices. Após os ensaios, a fim de facilitar a análise dos resultados os vórtices foram divididos em quatro grupos, sendo eles, sem vórtices, vórtices incipientes (tipo 1 ao 3), vórtices críticos (tipo 3 ao 5) e vórtices de bloqueio (tipo 6), utilizando a classificação de Padmanabhan e Hecker (1983). Além disso, para a não ocorrência de efeito de escala devido ao surgimento de forças viscosas e tensões superficiais na transposição de resultados dos modelos foram calculados os números de Reynolds, Reynolds radial e Weber. Alguns desses valores ficaram abaixo do mínimo desejável na região de Froude $< 0,3$, portanto, esses dados foram analisados com maior cuidado. Ainda, foram comparados os dados encontrados com os autores estudados na bibliografia, alguns tiveram resultados bem próximos aos encontrados no presente trabalho, alguns valores muito superiores e outros valores que não são condizentes com os encontrados no trabalho. Os dados obtidos para este trabalho são para condição de tomada vertical assimétrica e são válidos para os intervalos de medição empregados.

Palavras-chave: Tomadas d'Água Verticais. Formação de Vórtices. Modelo Experimental. Submergência Crítica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de funcionamento de uma usina hidrelétrica.....	15
Figura 2 – Influência da tomada d'água na altura da barragem.....	16
Figura 3 – Fluxograma indicativo das fases de pesquisa.....	20
Figura 4 – Vista geral da usina hidrelétrica de Itaipu.....	22
Figura 5 – Fluxograma divisão e classificação de tomadas d'água.....	23
Figura 6 – Tomada d'água de superfície.....	24
Figura 7 – Perfil de adução de uma tomada d'água.....	25
Figura 8 – Configurações de tomadas horizontais e verticais	27
Figura 9 – Classificação de tomadas quanto ao fluxo.....	28
Figura 10 – Condições de aproximação de fluxo de tomadas d'água.....	29
Figura 11 – Vórtice com arraste de ar	30
Figura 12 – Classificação de vórtices	31
Figura 13 – Dispositivos antivórtices.....	33
Figura 14 – Definição de submergência crítica.....	34
Figura 15 – Relação adimensional S/D em relação ao número de Froude.....	36
Figura 16 – Submergência recomendada por Knauss.....	43
Figura 17 – Configuração de tomadas d'água analisadas por Gordon.....	45
Figura 18 – Limites de submergência mínima para tomadas simétricas e assimétricas.....	46
Figura 19 – Curva de Denny e Young.....	48
Figura 20 – Modelo reduzido hidráulico.....	50
Figura 21 – Modelo reduzido hidráulico no LOH-UFRGS.....	51
Figura 22 – Placa de medição.....	51
Figura 23 – Registros	52
Figura 24 – Equipamentos para medição.....	53
Figura 25 – Esquematização tomada d'água vertical.....	53
Figura 26 – Fluxo do escoamento no modelo	54
Figura 27 – Vórtice tipo tulipa.....	56
Figura 28 – Área para quais os valores dos números de Reynolds, Reynolds radial e Weber podem ter problemas de escala.....	58
Figura 29 – Análise de dados da tomada vertical assimétrica.....	59
Figura 30 – Definição de áreas gráficas para tipos de vórtices.....	60
Figura 31 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Blaisdell.....	61

Figura 32 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Hecker.....	61
Figura 33 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Knauss.....	62
Figura 34 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Jain e Raju....	63
Figura 35 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Charg.....	63
Figura 36 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Berge.....	64
Figura 37 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Ferreira e Genovez.....	65

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classificação dos vórtices.....	32
Quadro 2 – Fórmulas encontradas na literatura para submergência crítica em tomadas horizontais e verticais.....	35
Quadro 3 – Condições de semelhança encontradas na bibliografia.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Máximos e mínimos dos adimensionais para cada tipo de vórtice.....	58
Tabela 2 – Porcentagem de quantidade de dados obtidos fora dos limites para efeito de escala.....	58

LISTA DE SIGLAS

IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas

LOH – Laboratório de Obras Hidráulicas

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UHE – Usina Hidrelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

V – velocidade (m/s)

S – submergência (m)

S_c – submergência crítica (m)

Re – número de Reynolds (adimensional)

We – número de Weber (adimensional)

ρ – massa específica (kg/m³)

D – diâmetro (m)

σ – tensão superficial (N/m)

g – aceleração da gravidade (m²/s)

Fr – número de Froude (adimensional)

ν – viscosidade cinemática (N.s/m²)

V_m – velocidade no modelo (m/s)

V_p – velocidade no protótipo (m/s)

h_m – altura no modelo (m)

h_p – altura no protótipo (m)

Re_r – Reynolds radial (adimensional)

C – coeficiente de aproximação usada por Gordon (adimensional)

SUMÁRIO

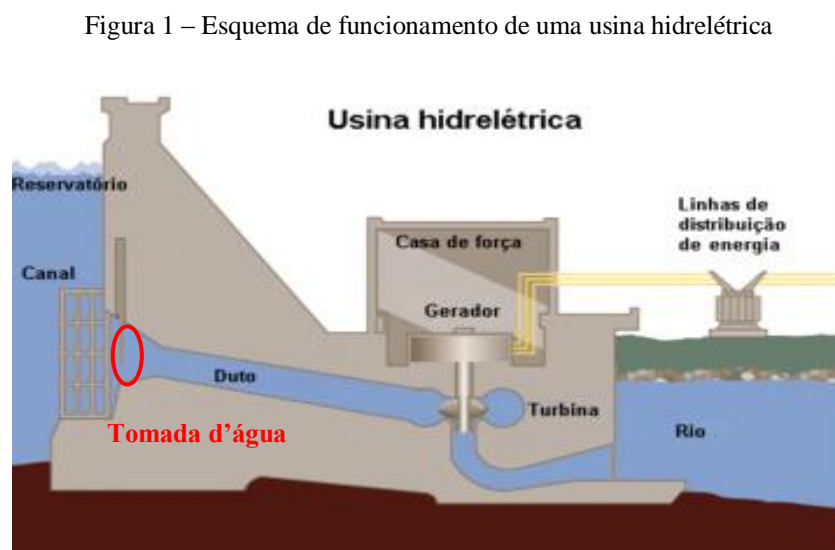
1 INTRODUÇÃO	15
2 DIRETRIZES DA PESQUISA.....	18
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA.....	18
2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	18
2.2.1 Objetivo Principal.....	18
2.2.2 Objetivos secundários.....	18
2.3 HIPÓTESE.....	19
2.4 PRESSUPOSTO.....	19
2.5 PREMISA.....	19
2.6 DELIMITAÇÕES.....	19
2.7 LIMITAÇÕES.....	19
2.8 DELINEAMENTO.....	20
3 TOMADAS D'ÁGUA.....	22
3.1 TIPOS DE TOMADAS D'ÁGUA.....	23
3.1.1 Tomadas d'água de superfície.....	23
3.1.2 Tomadas d'água submersas.....	24
3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS TOMADAS D'ÁGUA.....	26
3.2.1 Classificação das tomadas d'água quanto à disposição da captação da água..	26
3.2.2 Classificação das tomadas d'água quanto ao fluxo.....	28
3.2.3 Classificação das tomadas d'água quanto as condições de aproximação do fluxo.....	29
4 VÓRTICES.....	30
4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS VÓRTICES.....	31
4.2 DISPOSITIVOS ANTIVÓRTICES.....	32
4.3 SUBMERGÊNCIA EM TOMADAS D'ÁGUA.....	33
4.4 SUBMERGÊNCIA CRÍTICA EM TOMADAS D'ÁGUA.....	34
4.5 CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA.....	38
4.5.1 Análise adimensional.....	38
4.5.2 Leis de Semelhança.....	38
4.5.3 Efeitos de escala.....	40
4.5.4 Condições estabelecidas por autores lidos na bibliografia.....	41
4.6 CRITÉRIOS ADOTADOS PARA PROJETO DE TOMADAS D'ÁGUA DE HIDRELÉTRICAS.....	44

5 METODOLOGIA DE PESQUISA.....	49
5.1 MODELO HIDRÁULICO REDUZIDO.....	49
5.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO.....	52
5.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS.....	53
6 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	55
6.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DA TOMADA D'ÁGUA VERTICAL ASSIMÉTRICA.....	55
6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DA TOMADA D'ÁGUA VERTICAL ASSIMÉTRICA.....	56
7 CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS.....	68
APÊNDICE A	70

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui um grande potencial hidroelétrico devido às características da sua rede hidrográfica. A matriz energética brasileira é diferenciada em relação à matriz mundial, pois a maior parte da geração de eletricidade é feita a partir de fontes renováveis hidráulicas. Embora o país tenha atingido um estágio de excelência em tecnologia e pesquisa nessa área, ainda restam alguns problemas de difícil solução, como é o caso de otimização das técnicas de projeto de tomadas d'água em reservatórios, com o objetivo de obter um escoamento uniforme estável para a turbina sem a formação de vórtices, melhorando o seu desempenho e eficiência.

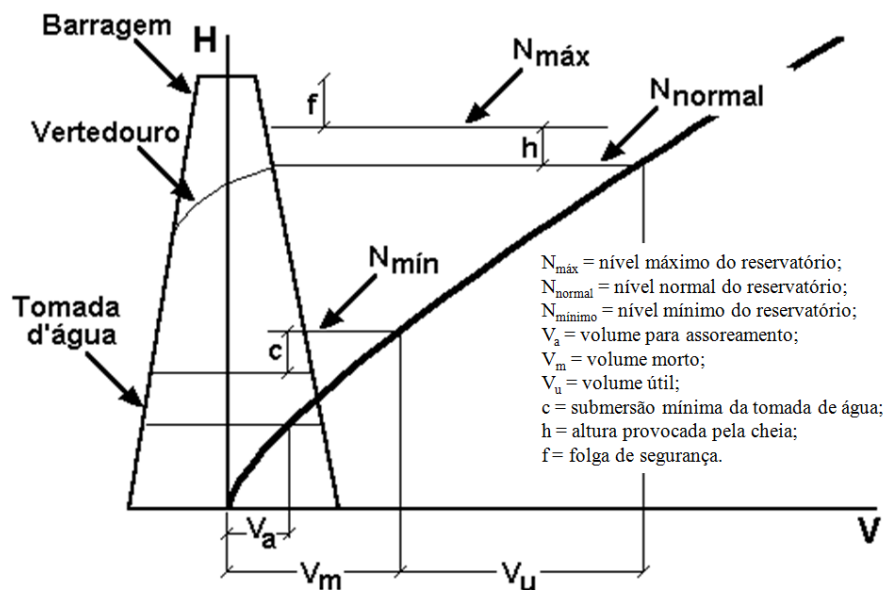
A tomada d'água é um dos principais elementos de um sistema de adução de uma usina. Tem o objetivo de capturar água de um reservatório para o sistema de adução, levando assim o fluxo até o local de sua utilização. Para projetar uma tomada d'água os engenheiros se deparam com dificuldades como prevenir a formação de vórtices, especialmente os vórtices de superfície livre, cuja presença no escoamento pode trazer consequências prejudiciais, desde a redução do coeficiente de descarga da tomada e queda do rendimento da turbina até o aparecimento de vibrações. A figura 1 apresenta um esquema de como é uma usina hidrelétrica e como é feita a captação de água pela tomada d'água.



(fonte: NOVA..., 2009)

A formação de vórtices em tomadas d'água de uma usina hidrelétrica está principalmente ligada à submersão, que é a altura entre a superfície da água e a geratriz superior da tubulação da tomada. Esse fenômeno também depende de outros fatores tais como o diâmetro da tomada d'água, ângulo de aproximação do escoamento, velocidade média no interior do tubo, Número de Reynolds, Número de Weber. A influência da submersão causa impacto diretamente na área de alagamento, altura da barragem, no volume morto e por consequência, nos custos da obra. A figura 2 ilustra a influência da submersão conforme citado.

Figura 2 – Influência da tomada d'água na altura da barragem



(fonte: trabalho não publicado¹)

O estudo dos fatores que influem na formação de vórtices é de suma importância para que não ocorra entrada de ar nas tomadas de água (turbinas ou bombas), fato que pode vir a prejudicar a operação do sistema de adução de água.

Uma das ferramentas que podem ser utilizadas para o estudo das condições de formação de vórtices em tomadas de água é o uso de modelos físicos. Estes permitem conhecer características do escoamento e do sistema antecipadamente, ainda na fase de projeto, sendo importante tendo em vista que um projeto não é igual ao outro. Entretanto, o uso de modelos experimentais deve ser meticuloso, devido aos efeitos de escala que estão associados

¹ Figura cedida pelo professor Marcelo Giulian Marques do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

principalmente a viscosidade e tensão superficial, uma vez que o líquido utilizado nos modelos geralmente é o mesmo do protótipo (água).

Para que o trabalho se tornasse mais objetivo, a análise sobre formação de vórtices foi delimitada apenas a estudos em uma tomada d'água vertical. É comum o estudo nessa área começar através de tomadas d'água verticais devido a maior facilidade de compreensão do tema. Além disso, o estudo sobre formação de vórtices em tomadas d'água de captação vertical tem grande utilidade para entendimento de sistemas de bombeamento na parte de sucção de bombas.

Neste contexto, o trabalho se propõe a analisar a formação de vórtices em um modelo experimental de tomadas d'água que se encontra no Laboratório de Obras Hidráulicas da UFRGS, com finalidade de estabelecer um padrão de comportamento segundo as variáveis mais importantes para a formação de vórtice no caso em particular para o modelo experimental.

Este trabalho divide-se em seis capítulos. Nesse primeiro, é feita uma introdução sobre o assunto proposto com o intuito de dar uma visão geral sobre o tema. No segundo capítulo, é abordada a questão de pesquisa, os objetivos principais e secundários, a hipótese, o pressuposto, a premissa, as delimitações, as limitações e o delineamento do trabalho, incluindo um fluxograma com as etapas da pesquisa. O terceiro capítulo apresenta o resultado de pesquisa bibliográfica sobre tomadas d'água, tipo e classificação das mesmas. Ainda, ilustra uma visão geral do funcionamento das tomadas d'água em usinas hidrelétricas e quais cuidados se devem ter com a manutenção das mesmas. O quarto capítulo apresenta o assunto vórtices, quais os principais fatores que interferem na formação dos vórtices, classificação dos mesmos, dispositivos antivórtices e sobre critérios de semelhança (análise dimensional, leis de semelhança e efeito escala) para analisar modelos reduzidos. O quinto capítulo apresenta o modelo experimental, mostrando detalhadamente os aparelhos de medição, as variáveis medidas e a metodologia dos ensaios realizados. O sexto capítulo mostra os resultados obtidos nos ensaios realizados no modelo experimental para tomada vertical assimétrica e também a análise feita para esses dados juntamente com o comparativo dos resultados encontrados no presente trabalho com os dos autores estudados na pesquisa bibliográfica.

2 DIRETRIZES DA PESQUISA

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho são descritas nos próximos itens.

2.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A questão de pesquisa do trabalho é: analisando a influência da variação da submergência e da vazão da tomadas d'água vertical, em quais situações são verificadas formação de vórtices nos ensaios em laboratório realizados?

2.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos da pesquisa estão classificados em principal e secundários e são descritos a seguir.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal do trabalho é a identificação e a análise das situações de operação do modelo experimental estudado, variando-se vazões e submergências, para as quais ocorre formação de vórtices na tomada d'água vertical assimétrica.

2.2.2 Objetivos secundários

Os objetivos secundários do trabalho são:

- a) comparação de diferentes condições de operação do modelo experimental, variando-se vazão e submergência, visando estabelecer a situação mais crítica para formação de vórtice;
- b) comparação entre dados obtidos nos ensaios do modelo experimental com a bibliografia existente sobre tomadas d'água para formulações de submergência e delimitações de áreas gráficas onde ocorre formação de vórtice.

2.3 HIPÓTESE

A hipótese do trabalho é que é possível determinar áreas gráficas para cada tipo de vórtice em função da submersão e vazão do escoamento, visto que, é possível determinar o Número de Froude através da vazão do escoamento.

2.4 PRESSUPOSTO

O trabalho tem por pressuposto que é possível analisar como se dá o funcionamento de uma tomada d'água vertical a partir do estudo do funcionamento de uma tomada d'água horizontal, visto que, para pesquisas nessa área é comum iniciar o estudo experimental a partir de tomadas d'água verticais que são de mais simples entendimento.

2.5 PREMISSE

O trabalho tem por premissa que, nas tomadas d'água, se deve estabelecer condições de escoamento sem a ocorrência de vórtices, principalmente em hidrelétricas, para não haver problemas de entrada de ar, que podem resultar em um aumento de perda de carga, problemas de vibração nos condutos de adução e/ou na turbina.

2.6 DELIMITAÇÕES

O trabalho delimita-se à ensaios de variação de vazão na tomada d'água vertical assimétrica e de variação de submersão no reservatório superior em acrílico do modelo experimental com o objetivo de encontrar as situações de operação nas quais ocorre formação de vórtices.

2.7 LIMITAÇÕES

São limitações do trabalho:

- a) a altura do reservatório superior em acrílico varia entre 0 e 45cm;
- b) o diâmetro externo da tomada d'água vertical que é de 100 mm;
- c) a vazão varia entre 0 e 13 litros por segundo;
- d) os ensaios experimentais feitos para uma tomada assimétrica vertical;

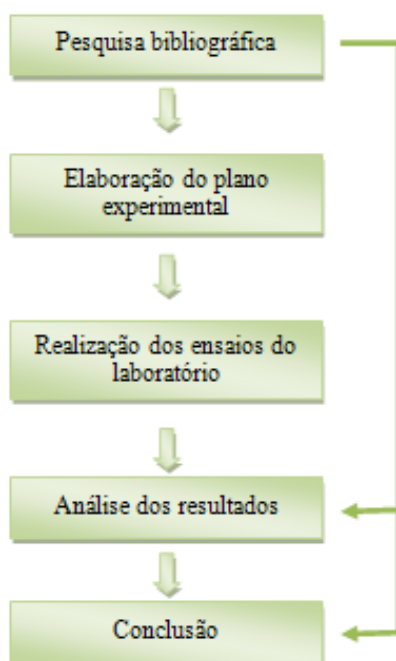
e) a tomada é circular, ou seja, de geometria simples.

2.8 DELINEAMENTO

O trabalho foi realizado através das etapas apresentadas a seguir, que estão representadas na figura 3, e são descritas nos próximos parágrafos:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) elaboração do plano experimental;
- c) realização dos ensaios do laboratório;
- d) análise dos resultados;
- e) conclusões.

Figura 3 – Fluxograma indicativo das fases de pesquisa



(fonte: elaborada pela autora)

Primeiro, foi realizada a **pesquisa bibliográfica**, com o intuito de aprofundamento dos conhecimentos sobre o assunto para analisar melhor maneira de realizar os ensaios, buscando quais devem ser os dados coletados de maior interesse. Após, na etapa de **elaboração do plano experimental**, foram definidos os detalhes dos ensaios. Foram decididos quais os intervalos de vazão e submergência para os ensaios, posicionamento das câmeras para filmagem dos ensaios, tempo de duração dos ensaios e o circuito que a água percorre.

Já para **realização dos ensaios do laboratório**, foram testadas todas as vazões e submergências possíveis entre as de interesse para a tomada d'água vertical, atravessando os dois tipos de circuito que a água percorre. Na **análise de resultados**, foram identificadas as situações de operação, vazões e submergências, nas quais houve ocorrência de formação de vórtices na tomadas d'água vertical. Além disso, foi feita uma comparação com os dados obtidos nos ensaios com dados obtidos em trabalhos que possuem mesma morfologia de modelo experimental que foram pesquisados na revisão bibliográfica.

Por fim, na **conclusão**, buscou-se estabelecer quais situações de operação são mais críticas para ocorrência de formação de vórtices na tomada d'água vertical.

3 TOMADAS D'ÁGUA

De acordo com Ferreira (2001, p. 1):

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.

Em usinas hidrelétricas, a água é conduzida até turbinas, as quais transformam energia mecânica em elétrica. As muitas condições de contorno que podem existir para uma tomada d'água, tais como, submergências, níveis operacionais e correntes de aproximação, tornam cada tomada única, sendo difícil existir duas tomadas d'água iguais. A figura 4 apresenta uma vista geral da usina hidrelétrica de Itaipu.

Figura 4 – Vista geral da usina hidrelétrica de Itaipu



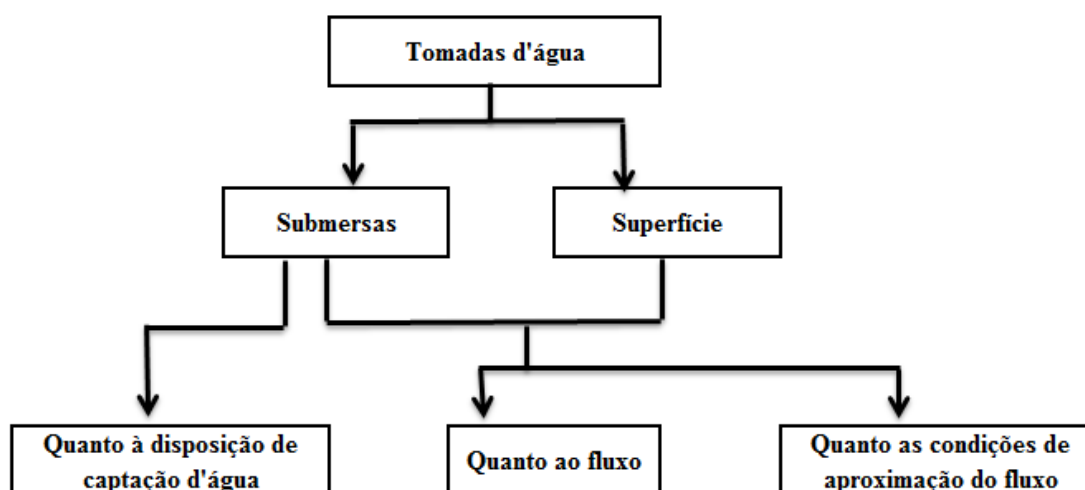
(fonte: adaptado de PROMON ENGENHARIA, 2012)

Nas usinas hidrelétricas, as tomadas d'água direcionam o escoamento para o conduto forçado, alimentando as turbinas para geração de energia. Resumidamente, elas devem ser um conjunto de estruturas e dispositivos, construídos junto a um manancial, com objetivo de conduzir a água aos órgãos adutores e depois para as turbinas. As tomadas d'água devem ser projetadas para funcionar interruptamente em qualquer época do ano, reduzir ao máximo possível as perdas de carga em todos seus trechos, impedir a entrada de corpos flutuantes que

possam danificar as turbinas, e ainda, facilitar o acesso para a operação e manutenção do sistema adutor (SCHREIBER, 1977).

Existem inúmeros tipos de tomadas d'água. Os principais podem ser classificados de acordo com sua posição em relação ao nível de água na represa. Nesse caso, as tomadas d'água se dividem em de superfície e submersas. São classificadas, ainda, quanto à disposição de captação d'água, quanto ao fluxo e quanto às condições de aproximação do fluxo. Esses detalhes são apresentados nos próximos itens e no diagrama da figura 5.

Figura 5 – Fluxograma divisão e classificação de tomadas d'água



(fonte: elaborada pela autora)

3.1 TIPOS DE TOMADAS D'ÁGUA

As tomadas d'água podem ser divididas em dois principais tipos, conforme citado, sendo eles, de superfícies e submersas. A descrição desses tipos é apresentada nos próximos itens.

3.1.1 Tomadas d'água de superfície

As tomadas de superfície, conforme figura 6, são feitas por canal. Podem ser classificadas quanto ao fluxo e as condições de aproximação do fluxo. Deixam a captação d'água em superfície livre, diretamente em contato com o ar atmosférico.

Dependendo da dimensão do canal, ficam mais expostas ao afluxo de corpos flutuantes perto da superfície da água, como folhas de árvores e galhos, por exemplo. Sendo assim, devem ter

grades para retenção de material flutuante e comportas para interrupção do fluxo, além de permitir a manutenção no sistema de adução. A limpeza das grades de proteção deve ser executada frequentemente. Além disso, as grades devem ser calculadas para resistirem ao empuxo d'água causado pela diferença do nível d'água, em seus dois lados (montante-jusante), em consequência do entupimento do espaço entre as barras (SCHREIBER, 1977).

Figura 6 – Tomada d'água de superfície



(fonte: trabalho não publicado²)

3.1.2 Tomadas d'água submersas

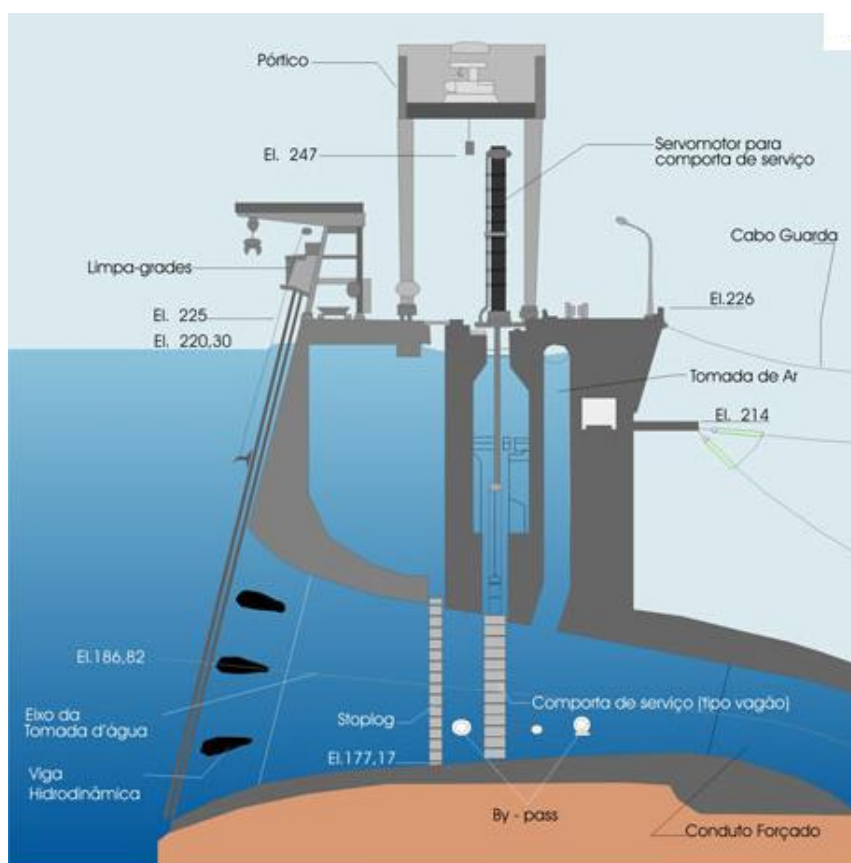
As tomadas d'água submersas, conforme a nomenclatura, ficam abaixo do nível de água. Podem ser classificadas quanto ao fluxo, às condições de aproximação do fluxo e à disposição de captação de água. O perfil de adução de uma tomada d'água submersa, em que se faz a captação da água para direcioná-la até as máquinas hidráulicas está representado na figura 7.

Nas tomadas de grande profundidade a pressão da água é maior, logo, as comportas devem ser mais pesadas. Por outro lado, o risco de entupimento das grades é menor e os dispositivos de limpeza podem ser mais simples. Igualmente, é aconselhável que possuam dispositivos mecânicos, tais como, grades para retenção de material flutuante e comportas para interrupção do fluxo em caso de manutenção do sistema de adução. Podem ter comportas de emergências (*stop-logs*) para uso eventual, quando da manutenção das comportas. Podem apresentar ponte

² Material de aula. **Tomadas d'água - parte 1**, disciplina obras hidráulicas do curso de engenharia civil do professor Marcelo Marques do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

rolante para colocação dos *stops-logs* ou comportas. As *stops-logs* devem ser colocadas a montante das grades para possíveis consertos das mesmas com a represa cheia. Essa solução serve para quando o nível da água na represa não pode ser abaixado até a soleira das grades, ou ainda, se elas não forem removíveis (SCHREIBER, 1977).

Figura 7 – Perfil de adução de uma tomada d'água



(fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2012)

Um dos principais problemas em tomadas submersas é a entrada de ar no sistema de adução por formação de vórtice junto à mesma. Segundo Ferreira (2001, p. 1):

Em instalações hidrelétricas, 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 da vazão da tomada e queda do rendimento da turbina. Além disto, elementos da tomada d'água (comportas e outros equipamentos de controle de vazão) podem estar sujeitos a efeitos danosos, tais como vibrações, ruídos, diminuição da vazão.

Para Ferreira (2001), além dos fatores citados, a formação de vórtice em tomadas d'água depende de outros fatores também, tais como:

- a) submergência que é a altura da coluna d'água acima da tomada;
- b) diâmetro da tubulação da tomada d'água;
- c) velocidade média do escoamento no interior do conduto;
- d) número de Froude;
- e) número de Reynolds;
- f) número de Weber do escoamento.

Ainda para Ferreira (2001), a proximidade da locação da tomada d'água com a superfície livre do reservatório pode favorecer a formação de vórtices, causando danos à operação do sistema hidráulico. Para evitar a formação de vórtice pode-se:

- a) aumentar a submergência, aumentando a profundidade da tomada. Mas deve-se ressaltar que quanto maior a profundidade da tomada, maior o custo da implantação, pois aumenta também a área alagada;
- b) aumentar o diâmetro da tubulação da tomada, diminuindo assim a velocidade do escoamento dentro da mesma.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS TOMADAS D'ÁGUA

As tomadas d'água podem ser classificadas segundo alguns fatores, tais como, a disposição da captação d'água, quanto ao fluxo e quanto às condições de aproximação do fluxo. Essas classificações são apresentadas nos próximos itens.

3.2.1 Classificação das tomadas d'água quanto à disposição de captação d'água

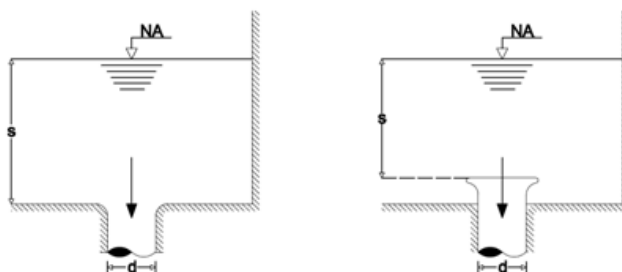
As tomadas d'água podem ter diferentes disposições para convergir o fluxo da água e, dependendo da sua posição de captação, há influência na formação de vórtices. Segundo Knauss (1987a), pode-se classificar as tomadas de água em de captação:

- a) vertical de descida (figura 8(a));
- b) horizontal (figura 8(b));
- c) inclinada de descida (figura 8(c));
- d) inclinada de subida (figura 8(d));
- e) vertical de subida (figura 8(e)).

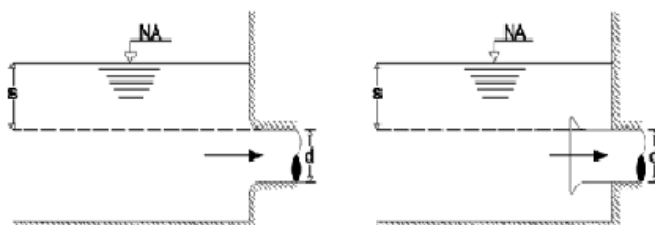
A figura 8 ilustra a configuração das disposições das tomadas d'água.

Figura 8 – Configurações de tomadas horizontais e verticais

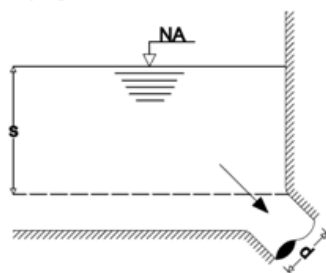
a) tomada d'água de captação vertical de descida



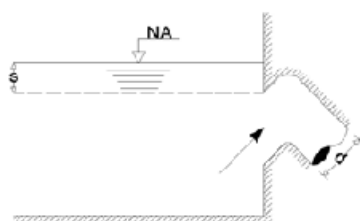
b) tomada d'água de captação horizontal



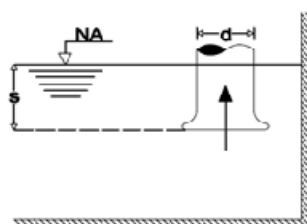
c) tomada d'água de captação inclinada de descida



d) tomada d'água de captação inclinada de subida



e) tomada d'água de captação vertical de subida



(fonte: adaptado de KNAUSS, 1987a)

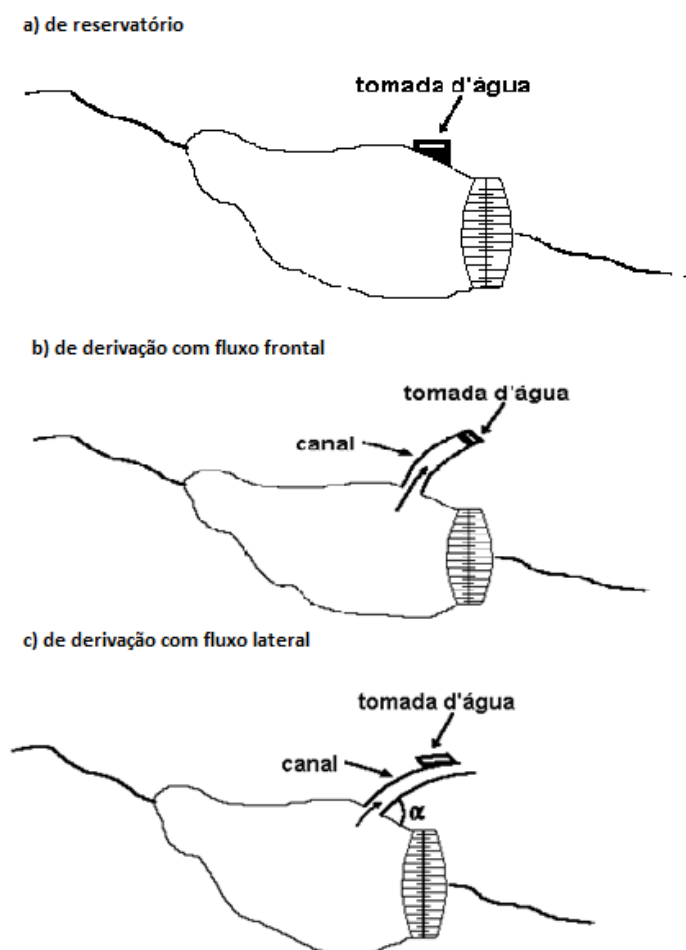
3.2.2 Classificação das tomadas d'água quanto ao fluxo

De acordo com Schreiber (1977), as tomadas podem ser classificadas quanto ao fluxo em:

- a) de reservatório, possuem velocidade de aproximação próxima de zero;
- b) de derivação com fluxo frontal;
- c) de derivação com fluxo lateral.

Na figura 9, apresenta-se o desenho explicativo das classificações das tomadas d'água de acordo com o fluxo.

Figura 9 – Classificação das tomadas quanto ao fluxo



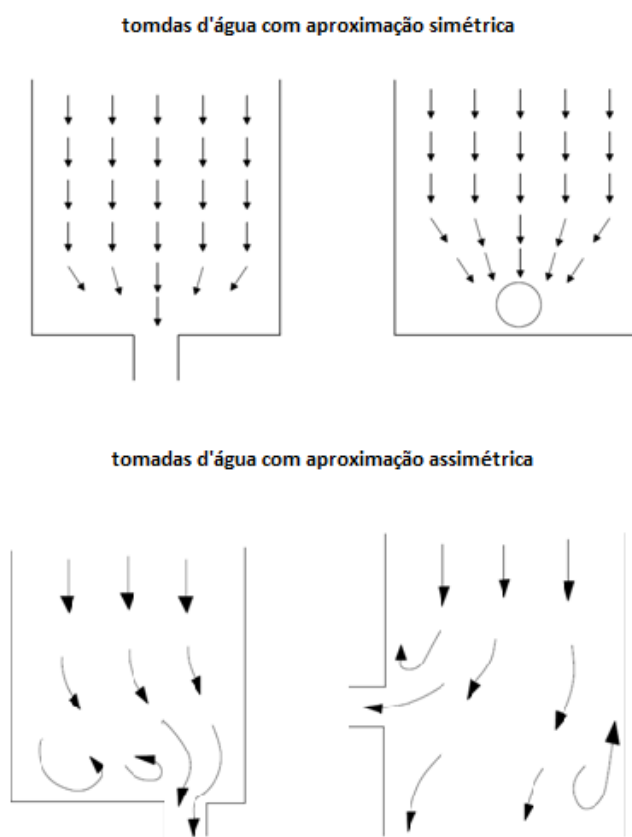
(fonte: trabalho não publicado³)

³ Material de aula. **Tomadas d'água - parte 1**, disciplina obras hidráulicas do curso de engenharia civil do professor Marcelo Marques do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.

3.2.3 Classificação das tomadas d'água quanto às condições de aproximação do fluxo

De acordo com Denny e Young⁴ (1957 apud KNAUSS, 1987a, p. 2), quanto às condições de aproximação as tomadas podem ser classificadas em simétricas e assimétricas. A simetria da tomada diz respeito às linhas de fluxo do fluido quando da convergência da tomada e estão apresentadas na figura 10.

Figura 10 – Condições de aproximação de fluxo em tomadas d'água



(fonte: adaptado DENNY; YOUNG⁵, 1957 apud KNAUSS, 1987a, p. 2)

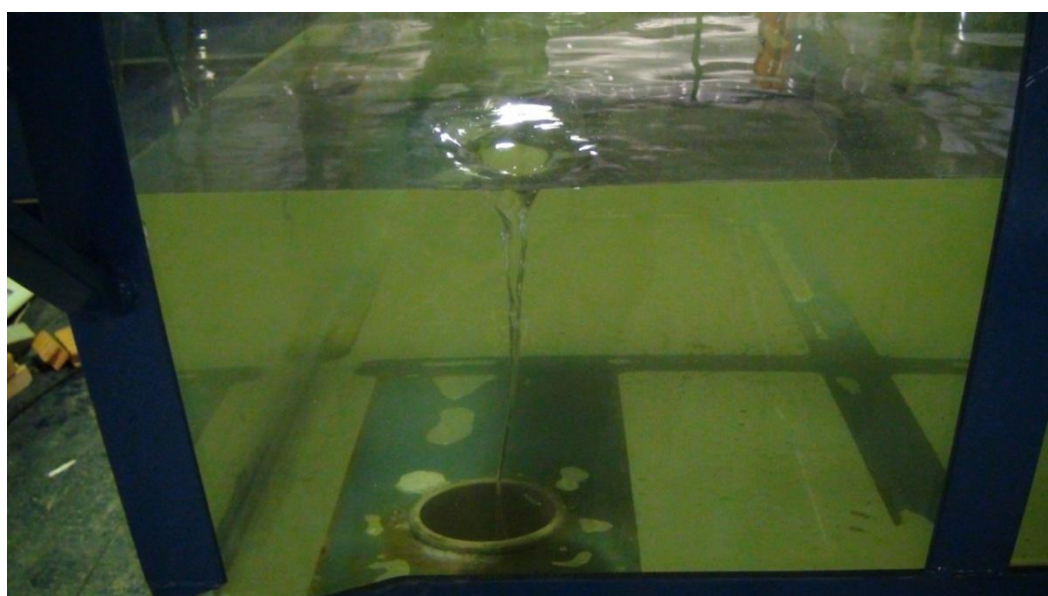
⁴ DENNY, D. F.; YOUNG, G. H. J. The prevention of vortices and swirl at intakes. In: CONGRESS LISSABON, n. 7, 1957. **Proceedings...**→ As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

⁵ op cit.

4 VÓRTICES

De acordo com Casamassa Neto (1992, p. 1), “Pode-se definir vórtice, como sendo o movimento de um fluido, com trajetórias circulares concêntricas.”. Na figura 11, é possível ver um vórtice com arraste de ar no escoamento.

Figura 11 – Vórtice com arraste de ar



(fonte: foto da autora)

Os vórtices podem ser extremamente prejudiciais aos sistemas hidráulicos. Diante disso, vê-se a necessidade de estudos sobre formação de vórtices na fase de projeto de tomadas d'água. Segundo Casamassa Neto, (1992, p. 1):

Em várias situações, em engenharia hidráulica, a formação de vórtice é um problema altamente significativo, que tem sido objetivo de numerosos estudos e pesquisas, principalmente no que diz respeito à formação de vórtice com arraste de ar em tomadas d'água, que é a parte de uma obra hidráulica que se destina a convergir parte ou todo o escoamento de rio, reservatórios, poço de sucção ou bomba ou canais, para o interior de condutos forçados.

Para Aoki (1982, p. 131):

No projeto de tomadas d'água, os engenheiros hidráulicos se deparam com uma grande dificuldade que é a prevenção de formação de vórtices, pois a ocorrência de vórtices nas tomadas d'água é ainda um assunto não esclarecido completamente,

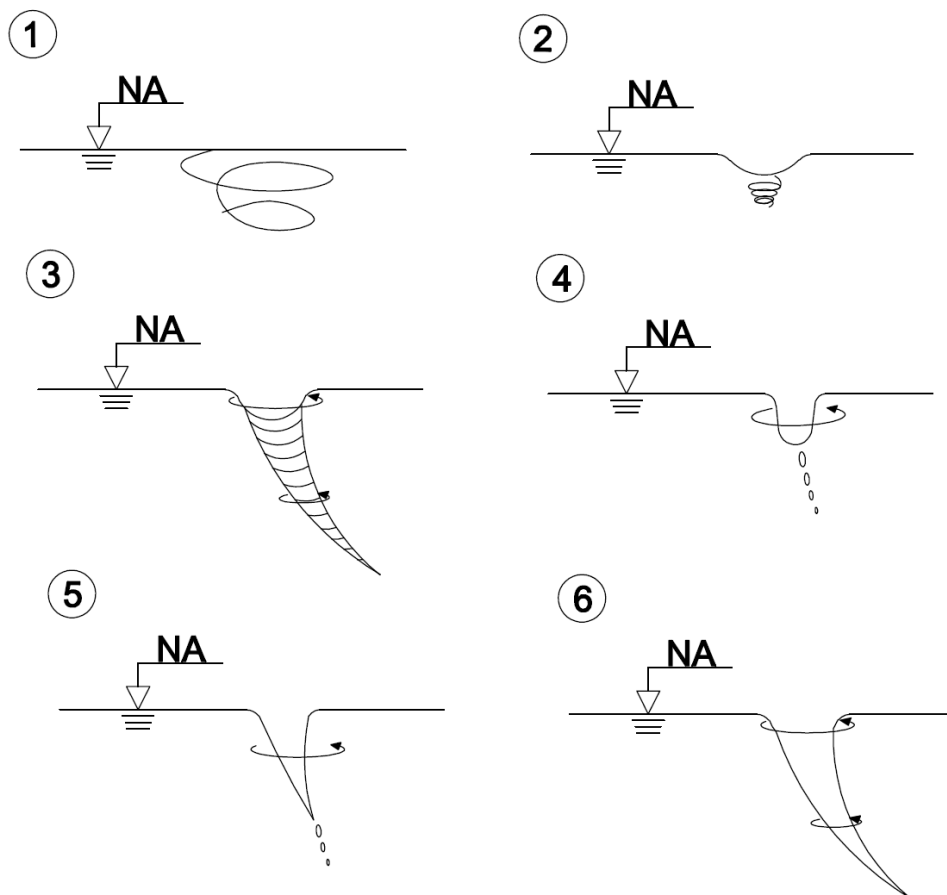
dada a natureza complexa do fenômeno. Sabe-se, entretanto, que a presença de escoamento com vorticidade pode trazer consequências prejudiciais ao desempenho de máquinas hidráulicas.

Devido ao entendimento que a formação de vórtices em tomadas d'água é, de fato, uma situação que gera problemas para um sistema hidráulico, faz-se necessário estudos aprofundados sobre classificação de vórtices, fatores que ajudam ao surgimento dos mesmos em tomadas d'água, maneiras de prevenir a aparição dos mesmos, entre outros tópicos. Isso é descrito nos próximos itens.

4.1 CLASSIFICAÇÃO DOS VÓRTICES

Padmanabhan e Hecker (1983, p. 1544), estudando efeitos de escala em poços de sucção, descreveram os vórtices conforme sua intensidade. Os autores apresentam os tipos na figura 12 e os classificam no quadro 1.

Figura 12 – Classificação de vórtices



(fonte: PADMANABHAN; HECKER, 1983)

Quadro 1– Classificação dos vórtices

TIPO DE 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

(fonte: PADMANABHAN; HECKER, 1983, p. 1544)

Conforme Casamassa Neto (1992, p. 2):

Vórtices de núcleo profundo, através do qual o ar é sugado para o interior do conduto forçado, são geralmente indicadores de problemas em tomadas d'água. A presença de ar em condutos forçados diminui a vazão de água, pois o ar ocupa um determinado volume, que seria preenchido pela água.

4.2 DISPOSITIVOS ANTIVÓRTICES

Os dispositivos antivórtices tem o objetivo de dificultar a formação de vórtices próximos à embocadura da tomada. Segundo Brito (2010, p. 14):

Qualquer alteração nas condições de funcionamento de um sistema elevatório implica a ocorrência de regimes hidráulicos variáveis durante um intervalo de tempo (geralmente pequeno), em que ocorre a passagem do regime permanente inicial ao regime permanente final. Estes regimes hidráulicos designam-se por regimes transitórios. As eventuais variações de pressão associadas a estes regimes, obrigam a recorrer aos dispositivos de proteção. Estes dispositivos permitem atenuar os picos de pressão no interior das condutas de forma a não serem excedidos os esforços admissíveis.

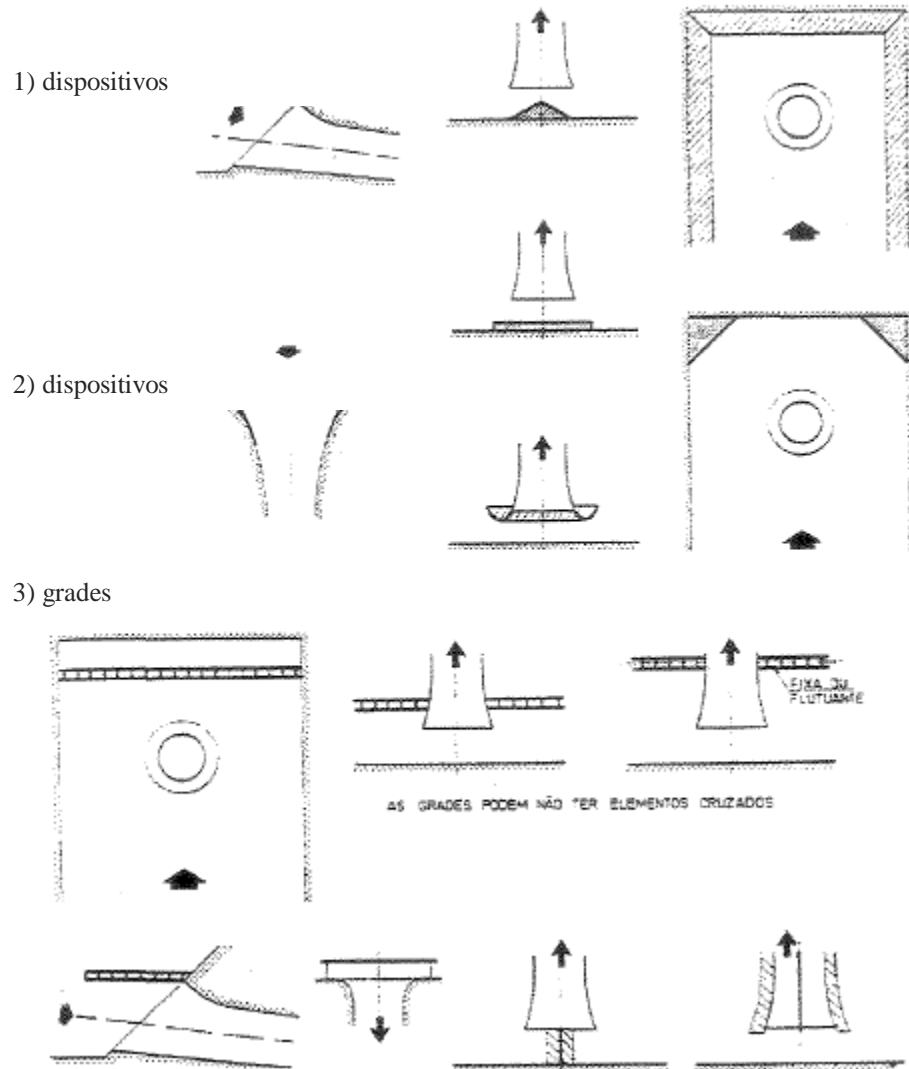
Martim⁶ (1983 apud FERREIRA, 2001, p. 28):

Faz uma análise de problemas práticos, concluindo que 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 *lay-out* da obra, usando alguns dispositivos antivórtices. Como mostra [...] [a figura 13], podem ser utilizadas grades horizontais e verticais ou alguns dispositivos para

⁶ MARTIM, R. **Vórtices em estruturas hidráulicas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1983. Boletim n. 594.

eliminar as zonas mortas do escoamento, as quais podem propiciar o aparecimento de vórtices.

Figura 13 – Dispositivos antivórtices



(fonte: adaptado de MARTIM⁷, 1983 apud FERREIRA, 2001, p. 29)

4.3 SUBMERGÊNCIA EM TOMADAS D'ÁGUA

De acordo com Casamassa Neto (1992, p. 45), “Submersão, S , de uma tomada d'água, é definida como a profundidade de água, desde a superfície livre até a entrada na tubulação (bordo superior).”.

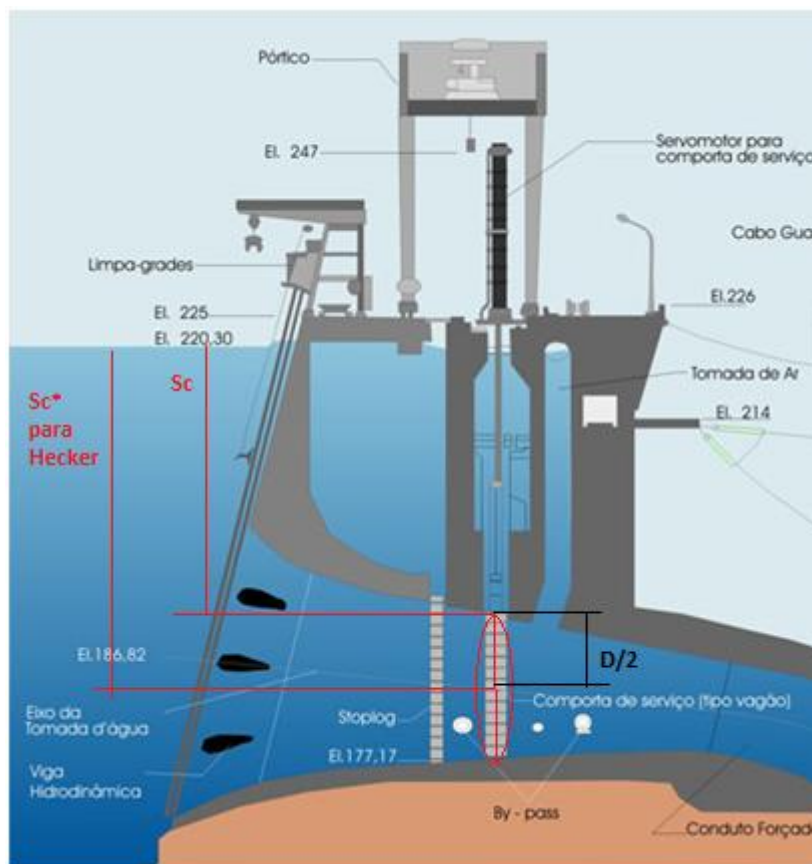
⁷ MARTIM, R. **Vórtices em estruturas hidráulicas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, n. 594, 1983. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pela autora lida.

As condições de aproximação do escoamento e velocidade no interior da tubulação são fatores de essencial dimensionamento juntamente com a submergência, S , que é um dos fatores determinantes na ocorrência de vórtices.

4.4 SUBMERGÊNCIA CRÍTICA EM TOMADAS D'ÁGUA

De acordo com Casamassa Neto (1992, p. 45), “Para qualquer tomada d’água, existe um valor mínimo ou crítico de submergência, denominado submergência crítica, S_c , abaixo do qual poderá ocorrer vórtices com arraste de ar.”. A figura 14 exemplifica a submergência crítica e o quadro 2 apresenta diferentes fórmulas para submergência crítica para tomadas horizontais encontradas na literatura.

Figura 14 – Definição de submergência crítica



(fonte: ITAIPU BINACIONAL, 2012)

Quadro 2 – Fórmulas empíricas para dimensionamento de tomadas d'água horizontais e verticais de acordo com diferentes autores

	AUTOR	FÓRMULA	SIMETRIA	OBSERVAÇÕES
Para tomadas horizontais	Gordon (1970)	$Sc = 0,545 * V * \sqrt{D}$ $Sc = 0,725 * V * \sqrt{D}$	Simétricas Assimétricas	Considerou vórtices a partir do tipo 3
	Blaisdell (1989)	$Sc = 1,70 * F$ $Sc = 2,23 * F$	Simétricas Assimétricas	Considerou vórtices a partir do tipo 3
	Gulliver et al. (1986)	$Sc = D * (1,7 + F)$	Sem diferenciação	Região onde a probabilidade de existência de vórtices é menor ($F < 0,5$ e $Sc/D < 0,7$)
	Hecker (1981)	$Sc^* = D * (0,5 + 2,3 * F)$	Sem diferenciação	Modelos baseados em semelhança de Froude operam melhor.
Para tomadas verticais	Knauss (1987a)	$Sc = 2 * D * F$	$S \geq D$	Estabeleceu apenas que a fórmula foi adquirida para experimento de tomada vertical
	Jain e Raju (1978)	$Sc/D = 4,5 * \sqrt{F}$	Sem diferenciação	Estabeleceu apenas que a fórmula foi adquirida para experimento de tomada vertical
	Chang⁸ (1979 apud KNAUSS, 1987b)	$Sc/D = 1,35 * F$	Sem diferenciação	Estabeleceu apenas que a fórmula foi adquirida para experimento de tomada vertical
	Berge⁹ (1966 apud KNAUSS, 1987b)	$Sc/D = 0,25 + 3,3 * \sqrt{F}$	Sem diferenciação	Estabeleceu apenas que a fórmula foi adquirida para experimento de tomada vertical
	Ferreira e Genovez (2005)	$Sc/D = 0,5$ $Sc/D = 3,0$	P/vórtices tipo 6 P/sem vórtices	Estabeleceu uma reta constante $Sc/D = 0,5$ e abaixo devem estar vórtices tipo 6 e analogamente $Sc/D = 3,0$ uma reta que acima dela não deve existir vórtices

Onde Sc é a submersão crítica, F o número de Froude, D o diâmetro da tomada e Sc^* considera a altura da coluna da água acima da tomada mais $0,5 D$. Simetria está relacionado as condições de uso das fórmulas, usar para tomadas simétricas, assimétricas, sem diferenciação, ou ainda, com outra condição de uso.

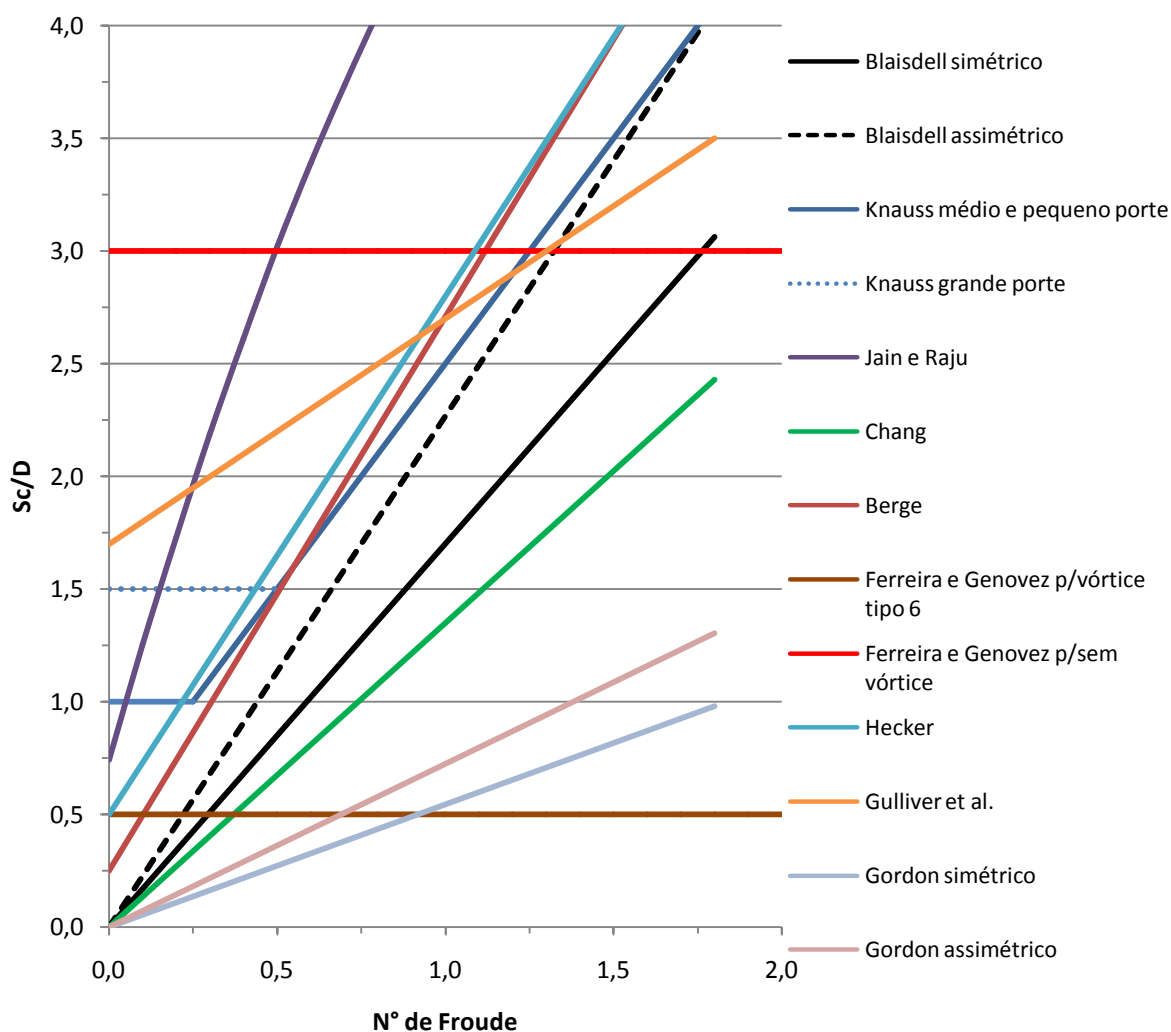
(fonte: elaborado pela autora¹⁰)

A figura 15 apresenta a relação adimensional Sc/D (submersão crítica/diâmetro) em relação ao número de Froude para as fórmulas apresentadas no quadro 2.

⁸ CHANG, E. Experimental data on the hydraulic design of intakes and rectangular pump sumps. **British Hydromechanics Research Association Report**, n. 1518. Jan. 1979. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pela autora lida.

⁹ 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. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pela autora lida.

¹⁰ Quadro baseado nos autores descritos, com suas fórmulas para submersão crítica.

Figura 15 – Relação adimensional S_c/D em relação ao número de Froude(fonte: elaborado pela autora¹¹)

Observa-se, na figura 15, uma diferença na declividade das retas, em função do tipo de vórtice considerado por cada autor para a fórmula da submergência crítica. Para os maiores valores de S_c/D deve ser considerada a existência de vórtices com menor probabilidade de entrada de ar, ou seja, quanto maior o S_c/D maior tendência de ocorrência de vórtice do tipo 1.

Gordon (1970), para o seu experimento, não considerou na sua expressão “tomadas com vórtice” pequenas depressões ou mesmo vórtices pequenos por não se transformarem em vórtices com arraste de ar. Portanto, para o presente trabalho é considerado como vórtice aqueles que se encontram na classificação a partir do vórtice tipo 3. Blaisdell (1989) adimensionalizou a fórmula para submergência crítica de Gordon (1970) e utilizou o Número de Froude para suas análises de dados nos gráficos.

¹¹ Gráfico baseado no quadro 2, seguindo as fórmulas de submergência crítica encontradas na literatura.

Gulliver et al. (1986) analisaram dados de 66 tomadas existentes e estudos em modelos. Colocados esses dados em um gráfico de Sc/D (submergência crítica/diâmetro) em função do número de Froude, definiram uma região ($F < 0,5$ e $Sc/D < 0,7$) em que a ocorrência de vórtices para tomadas horizontais é menos provável. Apesar disso, se a tomada tem condições muito irregulares de aproximação, pode haver a formação de vórtices, mesmo o ponto estando na região segura. Knauss (1987a), para seus estudos, apenas delimitou seus experimentos para tomada vertical.

Hecker (1981) para testar a capacidade dos modelos hidráulicos de preverem o aparecimento de vórtices, comparou dados de 22 modelos com dados observados em protótipos e dividiu as ocorrências em categorias:

- a) vórtices no protótipo mais intensos ou mais persistentes que no modelo (5);
- b) boa comparação entre vórtices do modelo e do protótipo (16);
- c) vórtices no protótipo mais fracos ou menos frequentes que no modelo (1).

Para Hecker (1981), os modelos operados com semelhança de Froude são adequados, apesar de terem algum efeito de escala quando simulam vórtices com núcleo.

Ferreira e Genovez (2005) fizeram diferenciação, no seu experimento, quanto ao tipo de vórtice 6 e sem vórtices, assim, definiram um área abaixo de uma reta para existência de vórtice tipo 6 e, uma acima de uma reta, para não existência de vórtices.

Os outros autores não se tem informação do tipo de vórtices que consideraram nos seus experimentos, a única diferenciação que se dá é pelo tipo de captação de água, diferenciando tomadas verticais de horizontais.

A partir desses autores e suas fórmulas para submergência crítica o que se consegue definir são áreas gráficas para cada tipo de vórtice, visualizando assim o número de Froude e valor Sc/D em que ocorre os mesmos.

4.5 CRITÉRIOS DE SEMELHANÇA

Para analisar estudos em modelos reduzidos deve-se utilizar critérios de semelhança, nos quais se incluem a análise adimensional, leis de semelhança e o estudo do efeito de escala, descritos nos itens abaixo.

4.5.1 Análise adimensional

Os estudos sobre escoamentos de fluidos podem ser realizados segundo algumas abordagens como modelagem numérica, física e analítica. Todas as abordagens de estudo sempre apresentam vantagens e desvantagens, algumas se aplicam melhor do que às outras dependendo do tipo de fenômeno de que o estudo relata.

No que se refere à modelagem física, obtêm-se vantagem no que diz respeito a visualização do escoamento, porém, ocupam grandes espaços e necessitam de instalações adequadas para realizar os estudos.

No que se refere à formação de vórtices, diversos trabalhos foram feitos tentando estabelecer as condições de semelhança para um modelo experimental. O que dificulta os estudos sobre formação de vórtice é exatamente reproduzir os efeitos viscosos, tensão superficial e velocidades em um modelo reduzido. De acordo com Casamassa Neto (1992, p. 71):

Existem duas maneiras, de se reproduzir o escoamento de um protótipo em modelo físico, através de semelhança dinâmica: a primeira é que todas as forças que atuam nos dois escoamentos, sejam reduzidas segundo um mesmo fator, além da semelhança geométrica; a segunda que os dois escoamentos sejam representados pela mesma equação do movimento adimensionalizada.

4.5.2 Leis de semelhança

Para o estudo de formação de vórtice em tomadas d'água utiliza-se o escoamento à superfície livre. Para escoamento à superfície livre são aplicadas as leis de semelhança, não devendo haver influências de forças viscosas e da tensão superficial.

Para estudos em modelos físicos é necessário utilizar análise dimensional para que não ocorra influência de efeitos viscosos principalmente quando o líquido utilizado é a água. Segundo Casamassa Neto (1992, p. 77), “Os efeitos viscosos têm sido estudados, por vários

pesquisadores, tentando estabelecer um número de Reynolds mínimo, além do qual o escoamento vorticoso torna-se independente do número de Reynolds.”.

Sendo assim, as leis de semelhança começam a ser analisadas utilizando análise adimensional (fórmula 1):

$$f(g, S, V, \nu, \rho, \sigma, D) \quad (\text{fórmula 1})$$

Onde:

g = aceleração da gravidade (m^2/s);

S = submersão (m);

V = velocidade (m/s);

ν = viscosidade cinemática (m^2/s);

σ = tensão superficial (N/m);

ρ = massa específica (kg/m^3);

D = diâmetro (m).

Então se obtém através de análise dimensional uma relação entre modelo e protótipo para o Número de Froude (fórmula 2):

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g \cdot h_m}} = \frac{v_p}{\sqrt{g \cdot h_p}} \quad (\text{fórmula 2})$$

Onde:

Fr = Número de Froude (adimensional);

v_m = velocidade do escoamento no modelo (m/s);

v_p = velocidade do escoamento no protótipo (m/s);

g = aceleração da gravidade (m/s^2);

h_m = profundidade do modelo (m);

h_p = profundidade do protótipo (m).

4.5.3 Efeitos de escala

As condições de semelhança entre modelo e protótipo necessitam de uma reprodução fiel do escoamento. Porém, não é possível a redução de todos os elementos envolvidos e isso faz com que se possa ter distorções que são chamadas de efeito de escala. Para escoamentos, o efeito escala pode ocorrer em função da viscosidade ou tensão superficial.

Efeitos de escala relativos à tensão superficial nas fórmulas de semelhança dinâmica, dada pela análise dimensional, aparecem através do número de Weber, fórmula 3:

$$We = V \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot d}{\sigma}} \quad (\text{fórmula 3})$$

Onde:

We = Número de Weber (adimensional);

V = velocidade (m/s);

σ = tensão superficial (N/m);

ρ = massa específica (kg/m³);

d = diâmetro do conduto (m).

Os efeitos de escala devido a viscosidade são estabelecidos pelo Número de Reynolds, fórmula 4, sendo que a bibliografia aponta para um número mínimo, a partir do qual o escoamento não seja mais dependente de Reynolds:

$$Re = \frac{V \cdot d}{\nu} \quad (\text{fórmula 4})$$

Onde:

Re = Número de Reynolds (adimensional);

V = velocidade (m/s);

d = diâmetro do conduto (m);

ν = viscosidade cinemática (m²/s).

4.5.4 Condições estabelecidas por autores lidos na bibliografia

Anwar (1966) estudou a formação de vórtices de pequena intensidade em um tanque com orifício no fundo e obteve como resposta que a formação de vórtices não depende do número de Reynolds radial desde que essa relação seja maior que 2000. O número de Reynolds Radial se dá pela fórmula 5:

$$Re_r = \frac{Q}{v \cdot S} \quad (\text{fórmula 5})$$

Onde:

Q = vazão (m³/s);

S = submersão (m);

v = viscosidade cinemática (m²/s).

Daggett e Keulegan¹² (1974 apud FERREIRA, 2001) investigaram a influência dos números de Reynolds e Weber na formação de vórtices, utilizando misturas de glicerina e óleos para obterem diferentes valores de tensão superficial e viscosidade, provocando assim a formação de vórtices em dois tanques cilíndricos de dimensões distintas, variando o diâmetro do orifício de entrada, simulando o experimento para diferentes tomadas e mudando a posição das pás que direcionavam a entrada do escoamento. Os autores chegaram à conclusão que para números de Reynolds maiores que 50.000 o coeficiente de descarga é função da circulação e, a medida que este diminui, os efeitos viscosos aumentam e o coeficiente de descarga torna-se uma função somente dependente do número de Reynolds. Além disso, segundo os autores, a tensão superficial não afeta a formação de vórtices.

No que se refere às condições de semelhança, Anwar et al. (1978), concluíram que para valores de número de Reynolds radial maiores que 30.000 e número de Weber elevado, é possível desprezar os efeitos da tensão superficial. Os autores determinaram que os parâmetros adimensionais importantes na formação de vórtices são o adimensional da submersão (função da submersão e do número de Froude), números de Reynolds, Weber e Reynolds radial.

¹² DAGGETT, L. L.; KEULEGAN, G. H. Similitude in free surface vortex formation. **Journal of Hydraulic Division**, v. 100, n. 11, p. 1565-1581, 1974.

Jain e Raju (1978) destinaram seus estudos à análise 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.

Para Aoki (1982), que realizou uma pesquisa bibliográfica sobre formação de vórtices em tomadas d'água, o fenômeno não está completamente elucidado, abrangendo ainda, alguns estudos com conclusões contraditórias.

Padmanabhan e Hecker (1983) estudaram a formação de vórtices em poços de sucção, estabelecendo a classificação dos vórtices, de um até o seis, de acordo, com sua intensidade.

Já para Gulliver et al. (1986) o mais difícil para um projeto de tomadas d'água é determinar a submergência mínima para a não formação de vórtices. A submergência depende, sobretudo, de alguns fatores, tais como, o diâmetro do conduto forçado, o ângulo de aproximação do fluxo, das dimensões da estrutura próximo à tomada e o número de Froude. De acordo com os estudos dos autores, haveria formação de vórtices para um número de Froude maior que 0,5 e para S/D (submergência/diâmetro) menor que 0,7.

Hecker (1981) utilizou o método de modelos finitos para determinação da vorticidade, e ainda, conclui que para estudos de formação de vórtices, os modelos físicos são os mais eficientes na determinação da ocorrência ou não de vórtices.

Knauss (1987a) analisou resultados de pesquisas anteriores para desenvolver uma equação generalizada para submergência crítica, apresentada na fórmula 6:

$$\left(\frac{h}{d}\right)_{crit} = \frac{k \cdot c}{d^2 \cdot \sqrt{g}} = k \cdot N_c \cdot F \quad (\text{fórmula 6})$$

Onde:

k = constante relação linear (adimensional);

h = é a profundidade da tomada até o centro do conduto (m);

d = diâmetro do conduto (m);

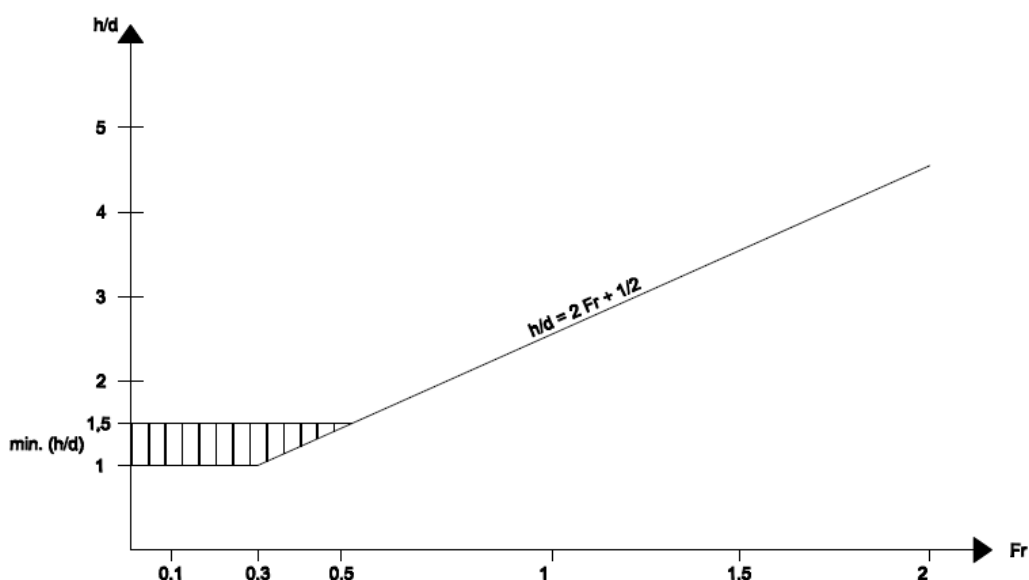
F = número de Froude do escoamento (adimensional);

V = velocidade do escoamento na tomada (m/s);

$N_c = c/(V_i \cdot r)$, c é a constante de circulação que é igual a $V_i \cdot r$, V_i é a velocidade tangencial de aproximação do escoamento (m/s) e r é o raio do vórtice formado (m).

Knauss (1987a) partiu dessa fórmula relacionando-a com quatro tipos de tomadas d'água: escoamentos em orifícios, tomadas verticais de descida, verticais de subida e horizontais, sempre encontrando relações lineares para k (constante de relação linear). Concluiu uma relação entre altura da coluna d'água acima da tomada (submergência), k (constante de relação linear) e Número de Froude, definindo assim uma submergência para seu experimento, conforme figura 16.

Figura 16 – Submergência recomendada por Knauss



(fonte: KNAUSS, 1987a)

Casamassa Neto (1992) analisou estudos sobre as condições de formação e prevenção de vórtices em tomadas de água e poços de sucção de bombas, destacando que a modelagem físico é necessário quando se requer garantir a não ocorrência de vórtices.

Ferreira et al.¹³ (2000 apud FERREIRA, 2001) 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

¹³ FERREIRA, L. M. C.; BORIN, D.; GENOVEZ, A. I. B. Submergência Crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, Córdoba, 2000, p. 673-680. **Anais...** → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

maiores que 3,0, não há a formação de vórtices. Além disso, Ferreira e Genovez (2005) 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 30.000 e de Weber acima de 120 para não haver efeito de escala.

Ferreira e Genovez (2005) concluíram que a relação mínima entre submergência e diâmetro do conduto forçado da tomada d'água é 0,5 para não formação de vórtices com arraste de ar e 3,0 para não formação de vórtices.

Dessa maneira, faz-se necessário observar e estudar em modelos os limites mínimos de submergência para evitar o aparecimento de vórtices com arraste de ar. O quadro 3 apresenta um resumo das condições de semelhança encontradas na literatura. Analisando-se os valores observa-se que são necessários modelos com uma escala muito grande para a representação de vórtices sem efeito de escala.

Quadro 3 – Condições de semelhança encontradas na bibliografia

AUTOR	CONDIÇÕES RESPEITADAS
Anwar (1966)	$Re_r \geq 2.000$
Daggett e Keulegan ⁸ (1974 apud FERREIRA, 2001)	$Re \geq 50.000$
Anwar et al. (1978)	$Re_r \geq 34.000$
Jain e Raju (1978)	$We > 120$
Gulliver et al. (1986)	$Fr \geq 0,5$
	$S/d < 0,7$
Ferreira e Genovez (2005)	$Re > 30.000$
	$We > 120$

(fonte: elaborado pela autora¹⁴)

4.6 CRITÉRIOS ADOTADOS PARA PROJETO DE TOMADAS D'ÁGUA DE HIDRELÉTRICAS

Para Brito (2010, p. 2):

O projeto de tomadas de água é uma tarefa complexa que integra várias vertentes que se condicionam mutuamente, tais como: a sua configuração geométrica, o posicionamento dos condutos de aspiração e o comportamento do escoamento. A utilização de normas, metodologias ou recomendações permite na prática obter soluções que satisfazem os requisitos de projeto das tomadas de água para os diferentes regimes de funcionamento das centrais de adução.

¹⁴ Quadro baseado nas condições que cada autor respeitou para seus devidos experimentos.

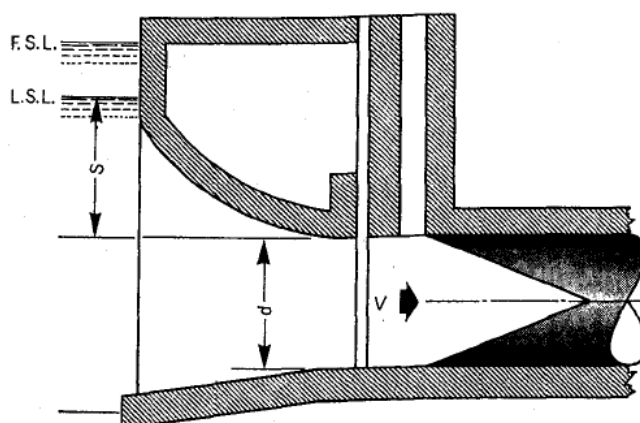
Quando um engenheiro se depara com um projeto de tomadas d'água de hidrelétricas, existem dificuldades que devem ser observadas, tais como:

- a) a prevenção de vórtices, pois a ocorrência dos mesmos pode causar consequências extremamente prejudiciais, desde a redução de geração de energia até a cavitação e vibrações;
- b) a análise da geometria do terreno, visando a não acumulação de detritos sólidos na entrada da tomada d'água.

Portanto, existe uma grande dificuldade em projetar uma tomada d'água, visto que é necessário estabelecer a eficiência na fase de operação.

Segundo Gordon (1970), depois da análise de 29 tomadas d'água de usinas hidrelétricas existentes sob os aspectos da velocidade, diâmetro da tomada, submergência e geometria de aproximação, concluiu que para as tomadas assimétricas, a probabilidade de aparição de vórtices é maior. Devido a cada projeto ser único, essas observações foram descartadas e foi dado mais ênfase na relação da submergência em função da velocidade. Na figura 17, tem-se a configuração das tomadas analisadas.

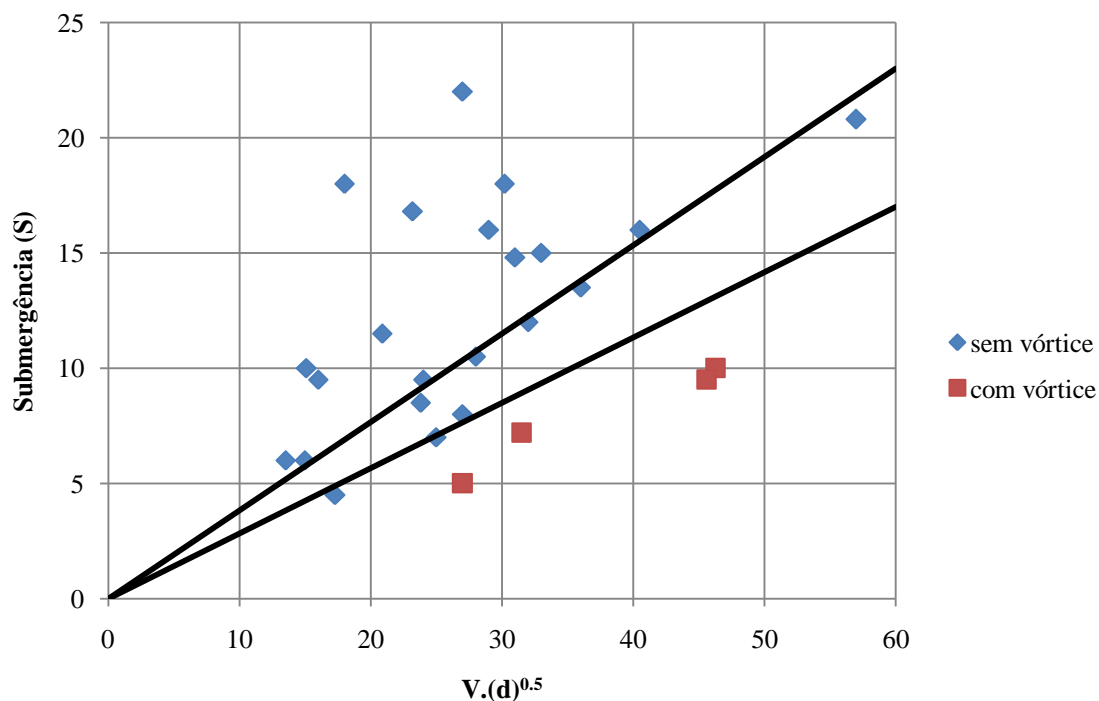
Figura 17 – Configuração de tomadas d'água analisadas por Gordon



(fonte: GORDON, 1970)

Os resultados encontrados por Gordon (1970) são apresentados na figura 18, no qual é visível a existência de duas retas. A parte superior das retas delimita a região de não ocorrência de vórtices, na região inferior as retas ocorrem vórtices com arraste de ar e a região entre as retas delimita a região de tomadas com valores de submergência mínima.

Figura 18 – Limites de submergência mínima para tomadas simétricas e assimétricas



(fonte: adaptado de GORDON, 1970)

Segundo Gordon (1970), após análise dos resultados dos estudos, chegou a fórmula empírica de submergência:

$$S = C \cdot V \cdot d^{0,5} \quad (\text{fórmula 7})$$

Onde:

S = submergência (m);

V = velocidade na tomada d'água (m/s);

d = diâmetro da tomada d'água na seção da comporta (m);

C = coeficiente de aproximação (adimensional).

O coeficiente de aproximação, transformado para unidades métricas, é 0,5434 para aproximação simétrica e 0,7245 para aproximação assimétrica (GORDON, 1970).

Blaisdell (1989) analisou a fórmula 7, dividindo a mesma pelo diâmetro, e acrescentando ao lado direito a raiz quadrada da aceleração da gravidade, tornando a fórmula adimensional, fórmula 8:

$$\frac{S}{d} = C' \cdot \frac{V}{\sqrt{g \cdot d}} = C' \cdot F \quad (\text{fórmula 8})$$

Onde:

S = submergência (m);

V = velocidade na tomada d'água (m/s);

d = diâmetro da tomada d'água na seção da comporta (m);

C' = coeficiente de aproximação (adimensional);

g = aceleração da gravidade (m/s²);

F= Número de Froude (adimensional).

A partir da fórmula 8, chega-se a fórmula 9:

$$C' = C \cdot \sqrt{g} \quad (\text{fórmula 9})$$

Onde:

C' = coeficiente de aproximação para Blaisdell (adimensional);

C = coeficiente de aproximação para Gordon (adimensional);

g = aceleração da gravidade (m/s²).

Sendo assim, C' é 1,70 para aproximação simétrica e 2,27 para aproximação assimétrica.

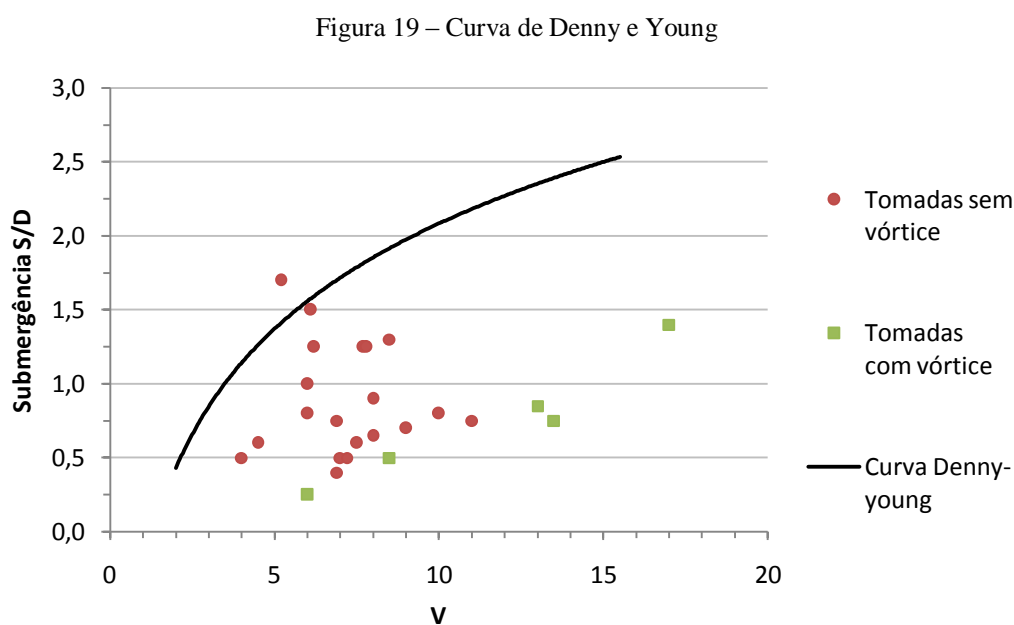
Denny e Young¹⁵ (1957 apud AOKI, 1982, p. 133):

Estes pesquisadores, após realizaram uma série de ensaios com tomadas d'água verticais ligadas a bombas centrífugas e inseridas no interior de poços de sucção, estabeleceram primeiramente que a ocorrência de vórtices é basicamente dependente de dois parâmetros: a submergência (S) da tomada e a velocidade (v) da água através do conduto da tomada.

¹⁵ DENNY, D. F.; YOUNG, G. H. J. The prevention of vortices and swirl at intakes. In: CONGRESS LISSABON, n. 7, 1957. **Proceedings...**→ As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

A curva apresentada por Denny e Young¹⁶ (1957 apud AOKI, 1982) permite verificar a possível formação de vórtices em tomadas d'água verticais, porém, devem ser analisadas as possibilidades de o projeto em questão ter geometria do poço de sucção e da tomada semelhante a algum dos casos analisados pelos autores, pois se isso ocorrer, a curva Denny-Young pode fornecer informações incorretas se as dimensões do projeto analisado forem muito diferentes das dimensões que os autores utilizaram para o seu experimento.

A figura 19 mostra a curva Denny-Young e os pontos de ocorrência e não ocorrência de vórtices devido aos parâmetros analisados, S/D (submersão/diâmetro) e v (velocidade do escoamento), para vários “lay-outs” de poços de sucção.



(fonte: adaptado de DENNY; YOUNG¹⁷, 1957 apud AOKI, 1982, p. 140)

¹⁶ DENNY, D. F.; YOUNG, G. H. J. The prevention of vortices and swirl at intakes. In: CONGRESS LISSABON, n. 7, 1957. **Proceedings...**→ As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

¹⁷ op. cit.

5 METODOLOGIA DE PESQUISA

Este capítulo está dividido em três partes. Na primeira parte, é apresentado o modelo reduzido hidráulico empregado no trabalho experimental. Na segunda parte, são indicados os equipamentos de medição utilizados e na terceira parte, é descrita a metodologia de ensaio.

5.1 MODELO REDUZIDO HIDRÁULICO

O presente trabalho faz parte de um projeto de pesquisa e desenvolvimento chamado “Formação de Vórtices em Tomadas d’Água de Usinas Hidrelétricas”, realizado numa parceria entre Furnas Centrais Elétricas e a Universidade Federal do Rio Grande do sul. Portanto, o modelo reduzido hidráulico que está localizado no Laboratório de Obras Hidráulicas (LOH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) usado na obtenção de dados desse trabalho é uma versão em escala 1:100 do modelo reduzido hidráulico que está localizado no Laboratório de Hidráulica Experimental de Furnas. Este foi reproduzido em escala 1:50 da tomada d’água da Usina Hidrelétrica de Serra da Mesa.

O modelo hidráulico instalado no LOH-UFRGS tem um tanque retangular em acrílico cujas medidas são 4 m de comprimento, 1,5 m de largura e 0,5 m de altura. O tanque fica elevado sobre uma estrutura com 2 m de altura em relação ao piso do laboratório e conta com um sistema de tubulação que pode caracterizar uma configuração tanto simétrica quanto assimétrica do escoamento, com três tomadas d’água, duas horizontais (simétrica e assimétrica) e uma vertical assimétrica, sendo o sistema retroalimentado com a utilização de uma bomba centrífuga com motor de 1,5 CV. É importante ressaltar que para o presente trabalho foi utilizada somente a tomada vertical assimétrica para os ensaios.

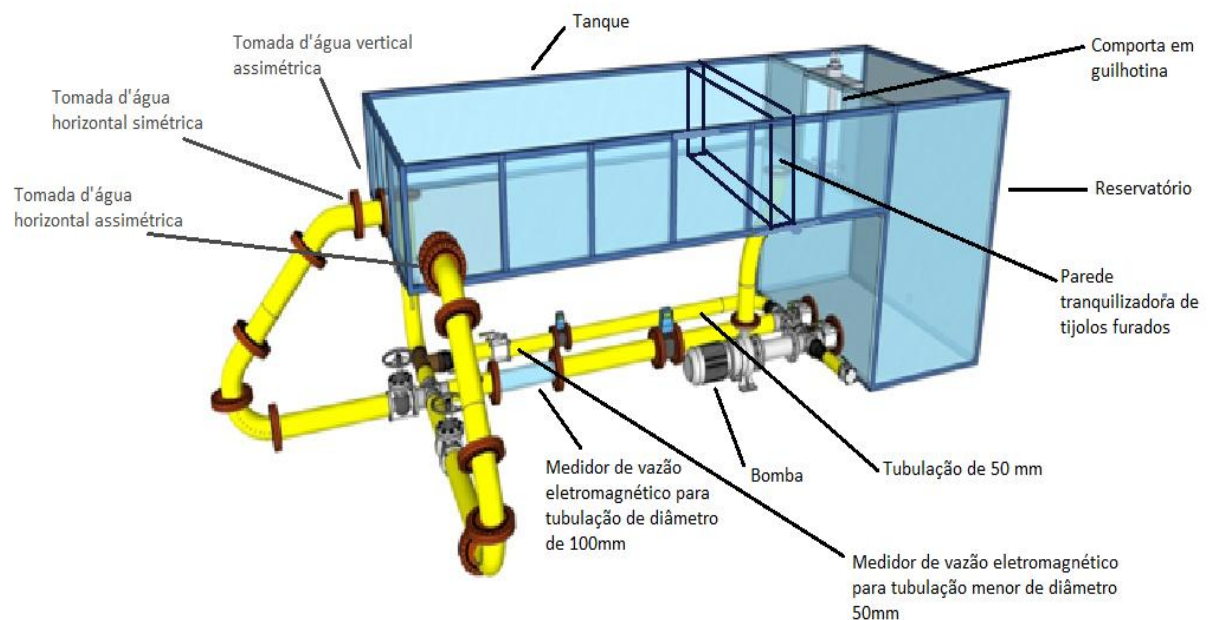
O modelo possui um sistema de tubulações em PVC, com diâmetro nominal de 100 mm, com um conjunto de peças, registros e um medidor de vazão eletromagnético para controle das condições de escoamento. Além disso, possui um circuito com um trecho de diâmetro menor, de 50 mm, e, tem instalado também outro medidor de vazão menor, para garantir o controle de vazão no modelo, mesmo para as condições de pequenas vazões analisadas.

O modelo ainda possui uma estrutura denominada “quebra-vórtice” que serve para solucionar o problema do efeito rotacional que a bomba provoca no escoamento em condição de circuito fechado, sendo que esse efeito acarreta condições inadequadas no escoamento para os ensaios. O quebra vórtice é um tubo de PVC com a parte interior preenchida com tubos menores visando à dissipação do efeito rotacional provocado pela bomba no escoamento.

Em virtude da perda de carga no sistema de tubulações e da necessidade de se manter o nível de água constante no tanque existe um reservatório ligado ao tanque para solucionar esses problemas. A ligação entre tanque e reservatório se dá através de uma comporta tipo guilhotina, com largura de $1/3$ da largura total desse tanque.

O modelo tem uma parede tranquilizadora de alvenaria de tijolos furados logo após a saída da água recalçada pela bomba que tem como função tranquilizar o escoamento afim de que sejam adquiridas as condições adequadas do mesmo para realização dos ensaios. Os detalhes do modelo hidráulico reduzido podem ser vistos na figura 20 e uma foto do mesmo instalado no LOH-UFRGS na figura 21.

Figura 20 – Modelo reduzido hidráulico



(fonte: elaborado pela autora)

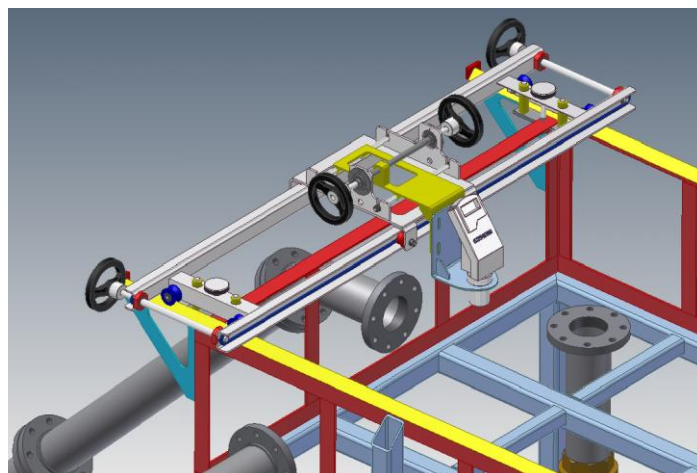
Figura 21 – Modelo reduzido hidráulico no LOH-UFRGS



(fonte: foto da autora)

O modelo hidráulico reduzido ainda conta com um sistema composto de uma placa de medição instalada sobre trilhos para permitir a movimentação nos planos x e y em relação ao tanque que serve para acoplar o aparelho medidor de nível ultrassônico. Os registros de gaveta e de esfera espalhados pelo circuito de tubulações em PVC têm a função de deixar apenas uma tomada sendo ensaiada e, também, para direcionar o fluxo de água conforme necessário para cada ensaio. A placa e os registros estão nas figuras 22 e 23, respectivamente.

Figura 22 – Placa de medição



(fonte: elaborado pela autora)

Figura 23 – Registros



(fonte: foto da autora)

5.2 EQUIPAMENTOS DE MEDIÇÃO

As variáveis quantificadas foram níveis d'água, vazões e condições de aproximação do fluxo.

A medição do nível d'água, tanto para controle quanto para cálculo de submergência, foi realizada por medidores de nível ultrassônico (de resolução de 1 mm) localizados na parte superior do modelo, e também, por réguas colocadas nas laterais do tanque.

A vazão foi medida e controlada por medidores de vazão eletromagnéticos e por controlador universal de processos instalado junto ao inversor de frequência do conjunto motor bomba do modelo. Para estabelecer as condições de ensaios necessárias foi utilizado um sistema de bombeamento (capacidade de bombeamento de 15 litros por segundo e uma altura manométrica de 5 metros) que necessita de um inversor de frequência cuja finalidade é de controlar rotação da bomba e assim estabelecer os valores de vazões ensaiados.

Por último, as condições de aproximação do fluxo neste trabalho foram analisadas apenas para formação de vórtices e classificação dos mesmos. Para isso, foi utilizado no tanque paredes de acrílico transparente que facilitam a observação da formação de vórtices e, também, foram filmados os ensaios. Uma câmera obtinha visão superior da tomada d'água vertical e, uma outra, obtinha visão lateral da tomada.

Na figura 24 é possível ver o medidor de vazão eletromagnético, o controlador universal de processos e também o medidor de nível ultrassônico.

Figura 24 – Equipamentos para medição



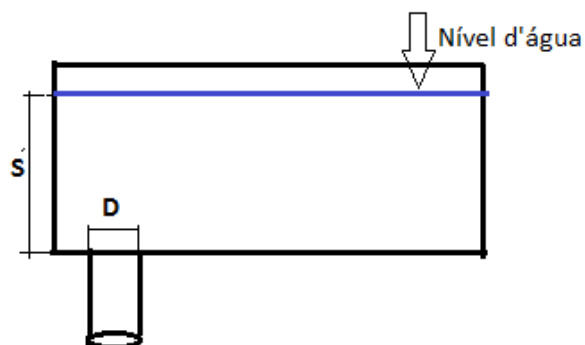
(fonte: foto da autora)

5.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS

Neste trabalho, foi definida como S , a altura da lâmina d'água acima da tomada d'água e como D , o diâmetro interno da tomada d'água que é fixo para a tomada d'água vertical assimétrica (diâmetro nominal de 100 mm e interno de 97,5 mm), conforme figura 25.

Figura 25 – Esquematização tomada d'água vertical

Tomada vertical assimétrica

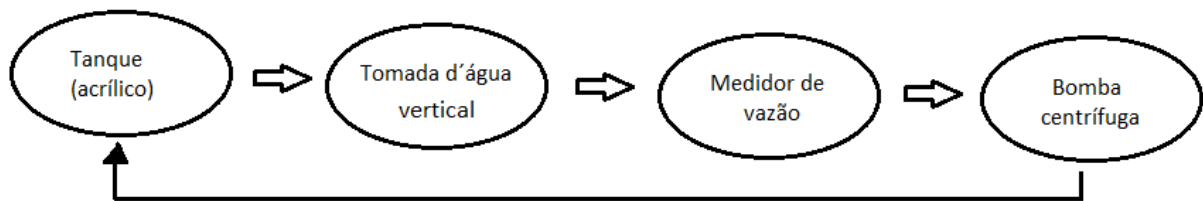


(fonte: elaborado pela autora)

Foram definidas antes dos ensaios, submergências e vazões para a tomada d'água vertical assimétrica para ser ensaiadas. Foram ensaiadas vazões de 1 até 13 L/s, variando em torno de 1 em 1 L/s e submergências de 2,5 cm até 30 cm, variando de 2,5 em 2,5 cm.

Primeiro, se encheu o tanque em acrílico até a altura desejável. Após, se esperou até o nível estabilizar com auxílio do controlador universal de processos. Com o nível estabilizado, se passou a controlar a vazão pela bomba centrífuga. Para cada nível de água (submergência) estabelecido, foram variadas todas as vazões, com ensaio de 4 minutos para cada vazão. Durante o ensaio, foram observados os vórtices que se formaram e qual tipo. Como indicado anteriormente, todos os ensaios foram filmados por duas câmeras a fim de ser possível observar várias vezes os vórtices formados e seus tipos. Logo após, alterou-se o nível do reservatório para a próxima altura programada, variando todas as vazões para esse nível e subsequentemente se fez isso para todos os níveis desejáveis. Na figura 26 aparece um diagrama da sequência do escoamento.

Figura 26 – Fluxo do escoamento no modelo



(fonte: elaborado pela autora)

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados, primeiramente, os resultados obtidos nos ensaios realizados na tomada d'água vertical assimétrica, de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5, e, após, é detalhada a sua análise.

6.1 RESULTADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS NA TOMADA D'ÁGUA VERTICAL ASSIMÉTRICA

De acordo com Padmanabhan e Hecker (1983) e com a metodologia descrita no capítulo 5, para cada ensaio foi feita a classificação do tipo de vórtice formado, de fraco (tipo 1) até intenso com arraste de ar (tipo 6). Ainda, foi considerado vórtice tipo 6*, um vórtice que o comportamento se assemelha ao de um vertedouro tulipa, onde o escoamento da água parece cair diretamente na tomada d'água, figura 27. O vórtice tipo 6* se diferencia do vórtice tipo 6, pois o vórtice tipo 6, como anteriormente demonstrado, tem o formato cônico, já o tipo 6* vai até a tomada com formato cilíndrico. Na tabela que está no apêndice A, foram analisados os tipos de vórtices, a vazão e a velocidade do escoamento na tomada d'água, S/D que é a submergência dividida pelo diâmetro, S que é a submergência, Número de Froude, Número de Reynolds, Reynolds radial (nomeado na tabela como Re_r) e C que é o coeficiente de aproximação (já definido anteriormente no presente trabalho na fórmula 7). Para cálculo dessas variáveis foi considerado uma temperatura da água de 19,6°C, uma viscosidade cinemática de $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, uma tensão superficial de 0,0727 N/m, uma massa específica de 998,12 kg/m³ e a aceleração da gravidade 9,806 m/s². Os Números de Reynolds, Froude, Weber e Reynolds radial estão na tabela no apêndice A em notação científica, por exemplo, 3,0 E + 04 é igual a $3,0 \times 10^4$.

Figura 27 – Vórtice tipo tulipa



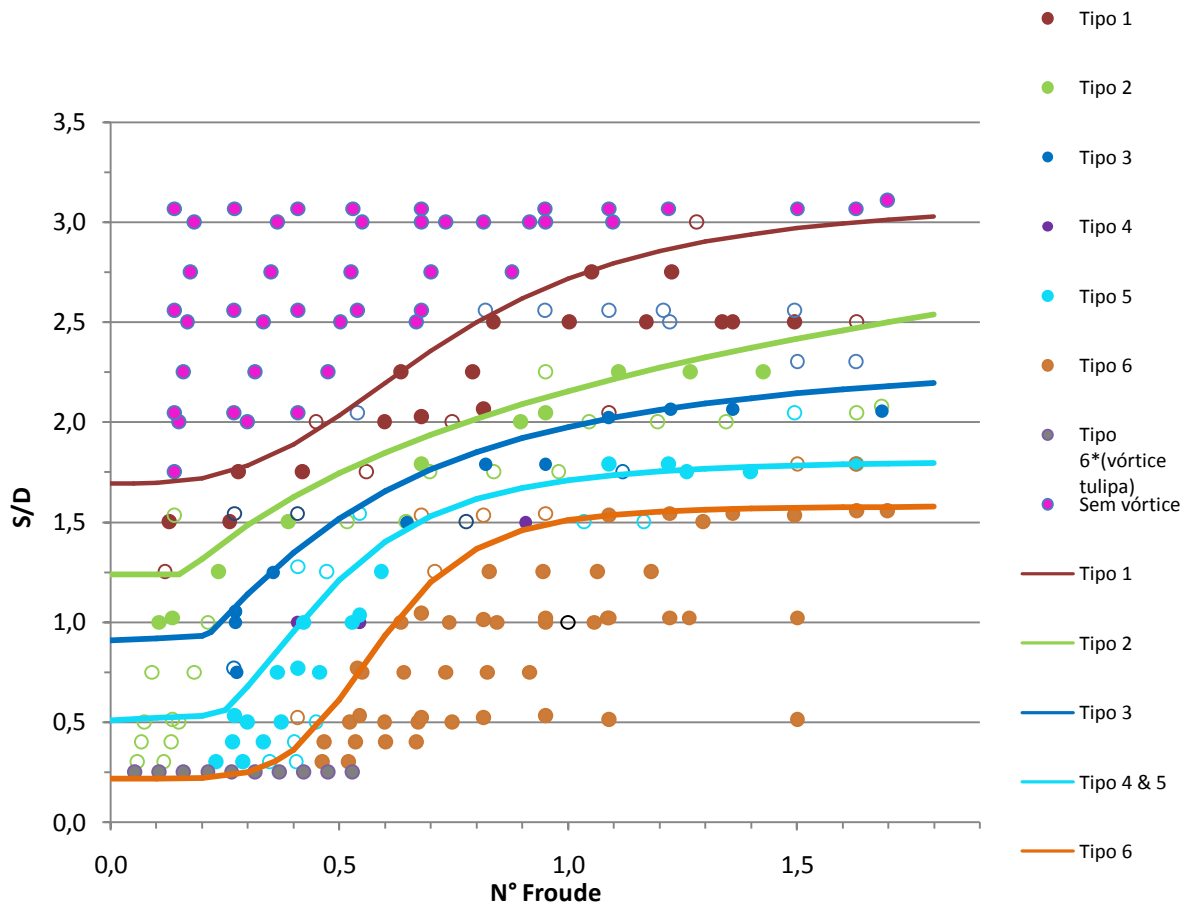
(fonte: foto da autora)

6.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DA TOMADA D'ÁGUA VERTICAL ASSIMÉTRICA

Os resultados obtidos no modelo experimental para condição da tomada vertical assimétrica foram analisados primeiramente isoladamente, na figura 28, na qual se pode observar que existem regiões definidas para cada tipo de vórtice. Essas regiões tem uma tendência semelhante que é de formar um patamar inicial e outro final, nos quais, a relação S/D varia muito pouco com o Número de Froude. Possui também uma região intermediária, em que S/D cresce de maneira aproximadamente linear com o aumento do Número de Froude. Devido à dificuldade de determinar se há arraste de partículas para dentro da tomada d'água devido a mesma não ser para este trabalho de tubulação transparente, foi determinado que os vórtices tipo 4 e 5 fossem alocados numa mesma região. Foi constatado que para regiões em que $S/D \leq 0,25$ são formados vórtices tipo 6 com comportamento semelhante a um vertedouro tulipa. Para região de S/D entre 1,71 e 2,91 e de Número de Froude entre 0,13 e 1,3 não houve ocorrência de vórtices. Já para região com Número de Froude entre 0,25 e 1,14, para que não haja ocorrência de vórtices com arraste de ar é recomendável que S/D esteja entre 0,57 e 1,75 (para Número de Froude $< 0,25$ também deve ser utilizado S/D mínimo de 0,57, analogamente para Número de Froude $> 1,14$ deve ser considerado $S/D \geq 1,75$).

Ainda, na figura 28, podem ser observados pontos que fogem a tendência geral devido ao comportamento inconstante dos vórtices, que oscilam muito rapidamente entre seus tipos, dificultando a determinação ao certo do tipo predominante no ensaio.

Figura 28 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica



(fonte: elaborado pela autora)

No quadro 3 anteriormente descrito nesse trabalho se tem alguns autores e suas condições de semelhança respeitadas para que seus modelos ao transporem dados para modelos de escalas diferentes não sofram influência de efeitos viscosos e tensão superficial. Na tabela 1, é possível ver os valores máximos e mínimos dos números de Froude, Reynolds, Reynolds radial e Weber para cada tipo de vórtice para este trabalho (nas tabelas 1 e 2 foram nomeados como tipo 0 para sem vórtices e tipo 6* para vórtice tulipa). Anwar (1966) estabeleceu que Reynolds radial deve ser maior que 2.000 e no presente trabalho obtemos Reynolds radial mínimo variando entre 15.800 e 121.500, portanto, para esse autor não ocorre influência da tensão superficial e efeitos viscosos na transposição de modelos de escalas diferentes. Anwar et al. (1978) estabelecem que para não ocorrer efeito de escala Reynolds radial deve ser maior que 34.000 e é possível ver na tabela 2 que dos dados encontrados aqui para Reynolds radial 2,7% estão abaixo de 34000. Além disso, em torno de 70 % desses 2,7% dos dados estão no vórtice tipo 2 e 30 % no vórtice tipo 6*. Na figura 29, é possível ver que esses dados estão alocados para número de Froude abaixo de 0,3. Jain e Raju (1978) determinaram que o

número de Weber > 120 e para o presente trabalho o número de Weber mínimo está entre 3,62 e 214. Na tabela 2 é possível ver que 20,3% dos dados estão com valores de número de Weber abaixo de 120, sendo que esses 20,3% estão divididos praticamente entre os vórtices tipo 3 e sem vórtices (denominado tipo 0 na tabela 2). Além disso, na figura 29, é possível ver que esses dados também se encontram na região onde número de Froude é menor que 0,3. Já Daggett e Keulegan¹⁸ (1974 apud FERREIRA, 2001) estabeleceram que o número de Reynolds radial deve ser maior que 50.000 e no presente trabalho 8,8% dos dados estão abaixo desse valor. Também se encontram numa região para número de Froude abaixo de 0,3, conforme figura 29. Por último, Ferreira e Genovez (2005) estabeleceram que para não influência de forças viscosas e tensão superficial o número de Reynolds deveria ser maior que 30.000 o que não ocorre para 20,7% dos dados do trabalho, sendo que esses dados também se encontram na região onde Froude é menor que 0.3.

Tabela 1 – Máximos e mínimos dos adimensionais para cada tipo de vórtice

Vórtices	Froude		Reynolds		Weber		Reynolds Radial	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
tipo 6*	0,529	0,053	50141,75	5027,06	360,04	3,62	157524,95	15792,99
tipo 6	1,699	0,408	161123,88	38669,73	3717,68	214,14	506185,59	121484,54
tipo 5	1,631	0,231	154678,92	21912,85	3426,21	68,76	485938,16	68841,24
tipo 4	0,907	0,317	85975,70	30033,49	1058,53	129,17	270100,63	94352,99
tipo 3	1,686	0,174	159834,89	16499,08	3658,44	38,98	502136,10	51833,40
tipo 2	1,686	0,058	159834,89	5542,66	3658,44	4,40	502136,10	17412,78
tipo 1	1,631	0,118	154678,92	11214,22	3426,21	18,01	485938,16	35230,52
tipo 0	1,699	0,140	161123,88	13276,61	3717,68	25,24	506185,59	41709,69

(fonte: elaborado pela autora)

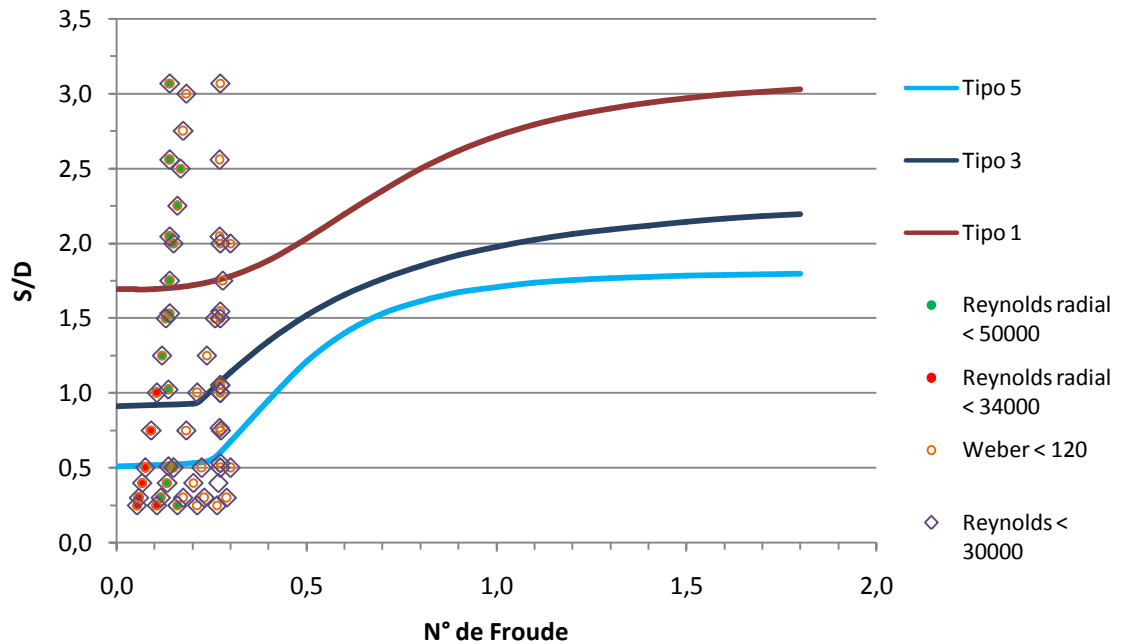
Tabela 2 – Porcentagem de quantidade de dados obtidos fora dos limites para efeito de escala

Tipos de vórtice	Total dados	Jain e Raju (1978)		Anwar et al. (1978)		Dagget e Keulegan (1974)		Ferreira e Genovez (2005)	
		Total de dados Weber < 120		Total de dados Rer < 34000		Total de dados Rer < 50000		Total de dados Re < 30000	
Todos tipos	261	53	20,3%	7	2,7%	23	8,8%	54	20,7%
Tipo 6*	10	5	9,4%	2	28,6%	3	13,0%	5	9,3%
Tipo 6	64	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
Tipo 5	31	5	9,4%	0	0,0%	0	0,0%	6	11,1%
Tipo 4	4	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%	0	0,0%
Tipo 3	24	11	20,8%	0	0,0%	0	0,0%	11	20,4%
Tipo 2	32	13	24,5%	5	71,4%	11	47,8%	13	24,1%
Tipo 1	42	6	11,3%	0	0,0%	2	8,7%	6	11,1%
Tipo 0	54	13	24,5%	0	0,0%	7	30,4%	13	24,1%
		Soma	100,0%	Soma	100,0%	Soma	100,0%	Soma	100,0%

(fonte: elaborado pela autora)

¹⁸ DAGGETT, L. L.; KEULEGAN, G. H. Similitude in free surface vortex formation. **Journal of Hydraulic Division**, v. 100, n. 11, p. 1565-1581, 1974.

Figura 29 – Área para quais os valores dos números de Reynolds, Reynolds radial e Weber podem ter problemas de escala

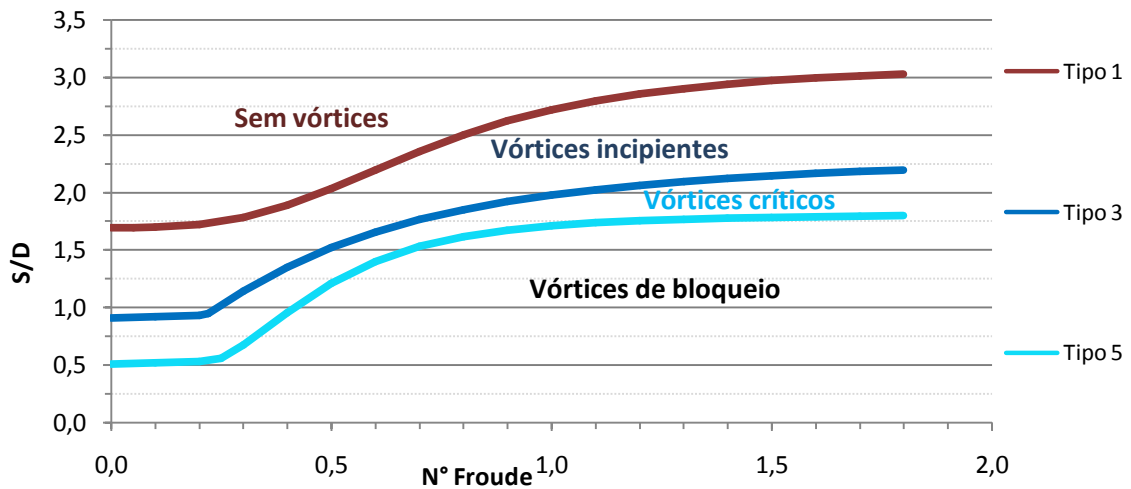


(fonte: elaborado pela autora)

Na figura 30, deixando apenas as linhas 1, 3 e 5, consegue-se estabelecer quatro regiões, podendo dividi-las em:

- sem ocorrência de vórtices acima da linha do tipo 1,
- vórtices incipientes que não causam danos à tomadas de usinas hidrelétricas entre as linhas do tipo 1 ao 3,
- vórtices críticos, que se tratam de vórtices com arraste de ar, da linha do tipo 3 ao 5,
- vórtices de bloqueio (considerados para o trabalho vórtices do tipo 6) que está na região abaixo da linha tipo 5.

Figura 30 – Definição de áreas gráficas para tipos de vórtices

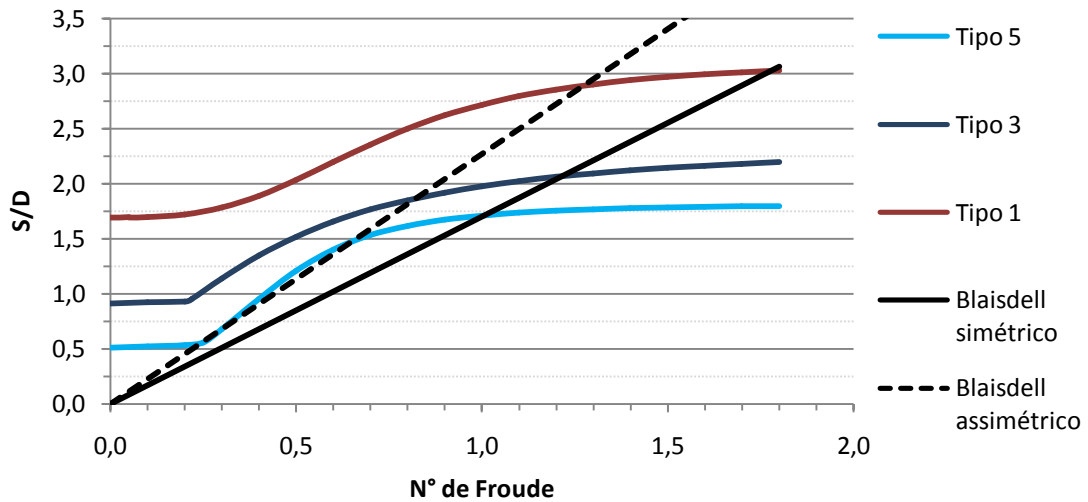


(fonte: elaborado pela autora)

Depois de analisar os dados obtidos nos ensaios separadamente, foram analisados os dados de maneira comparativa aos autores citados na bibliografia lida. A partir daqui, as análises serão feitas de acordo com as áreas definidas neste trabalho na figura 30.

Gordon (1970) analisou 29 tomadas d'água de usinas hidrelétricas para seu experimento, considerando vórtices apenas a partir do tipo 3 e delimitou regiões através de duas retas. Na região inferior as duas retas, ocorrem vórtices com arraste de ar; a região superior as duas retas delimita a não ocorrência de vórtices; a área entre as retas delimita a região de tomadas com valores de submersão mínima. Blaisdell (1989) apenas adimensionalizou a fórmula de Gordon (1970) dividindo a submersão pelo diâmetro e utilizando Número de Froude para seus gráficos. Na figura 31, aparecem os dados obtidos nos ensaios plotados para as retas de Blaisdell (1989), em que se pode observar que apenas para a região onde o Número de Froude $> 1,2$ e $S/D > 2,0$ é que se tem uma região segura dentro da área de vórtices incipientes. Para essa comparação cabe ressaltar que Blaisdell (1989) se baseou em tomadas d'água de captação horizontal, o que provavelmente foi o motivo de os dados do ensaio do modelo experimental não estar bem dimensionado para região de Número de Froude $< 1,2$ e $S/D < 2,0$.

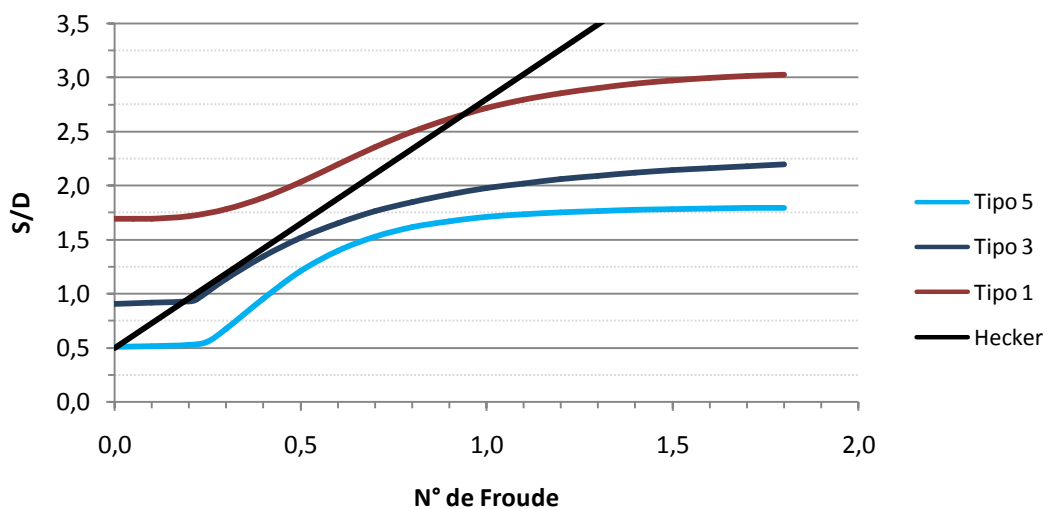
Figura 31 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Blaisdell



(fonte: elaborado pela autora)

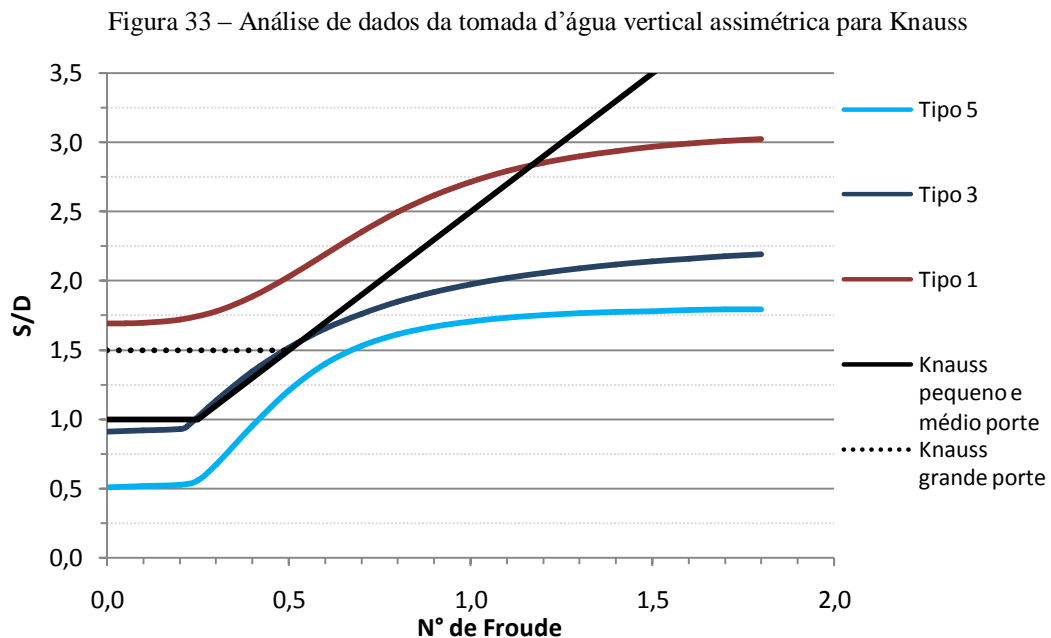
Para Hecker (1981), os modelos experimentais são mais adequados para ensaios sobre formação de vórtices e os que trabalham com semelhança de Froude operam melhor. Na figura 32, é possível ver que o dimensionamento exigido pelo autor atende o bom funcionamento de uma usina hidrelétrica para a região de Número de Froude $> 0,2$ e $S/D > 1,0$. Já para região em que se tem Número de Froude $< 0,2$ e $S/D < 1,0$ não ocorre bom dimensionamento do autor, pois, está na área de vórtices críticos (região entre tipo 3 e tipo 5). Ainda se deve avaliar que este autor analisou tomadas d'água de captação horizontal o que não condiz com esse experimento.

Figura 32 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Hecker



(fonte: elaborado pela autora)

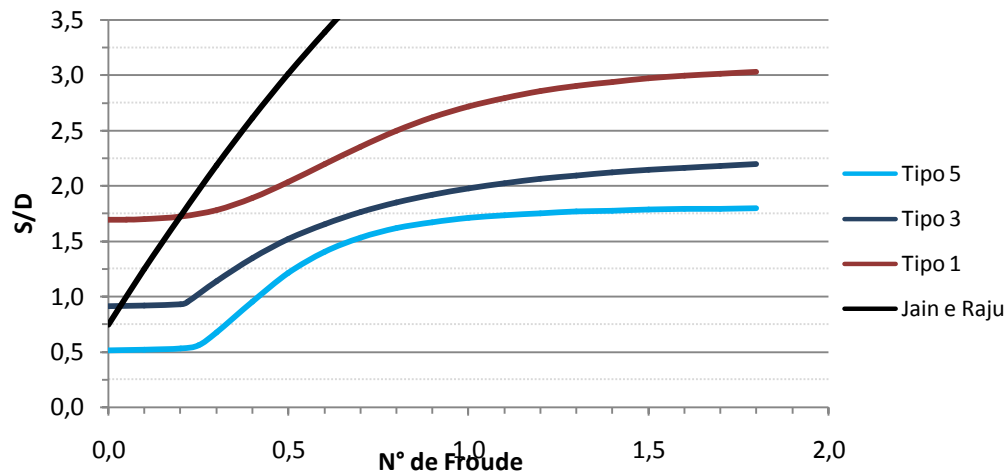
Knauss (1987a) considerou a existência de vórtice a partir do tipo 3 e definiu uma região onde é menor a probabilidade de ocorrência de vórtices para Número de Froude $< 0,5$. Na figura 33, se pode ver que para Número de Froude abaixo de 0,5 realmente há ocorrência de vórtices tipo críticos e de bloqueio para a relação $S/D < 1,3$ aproximadamente. Ainda é possível analisar que o dimensionamento proposto pelo autor garante bom funcionamento para uma usina hidrelétrica tanto de pequeno e médio porte quanto para de grande porte devido às áreas de vórtices de bloqueio e críticos estarem todas abaixo das retas. As recomendações desse autor estão bem próximas as do presente trabalho para o limite de ocorrência de vórtices do tipo 3, tanto que a reta de pequeno e médio porte está praticamente sobreposta a linha do tipo 3.



(fonte: elaborado pela autora)

É possível ver na figura 34 que os valores sugeridos por Jain e Raju (1978) são significativamente superiores aos encontrados no presente trabalho gerando um ótimo funcionamento da usina hidrelétrica, porém, causando um superdimensionamento da estrutura para a tomada d'água vertical. Essa diferença grande de dados encontrados provavelmente se justifique devido ao tipo de estrutura ensaiada pelo autor que tinha aletas direcionais que favoreciam a ocorrência de vórtices.

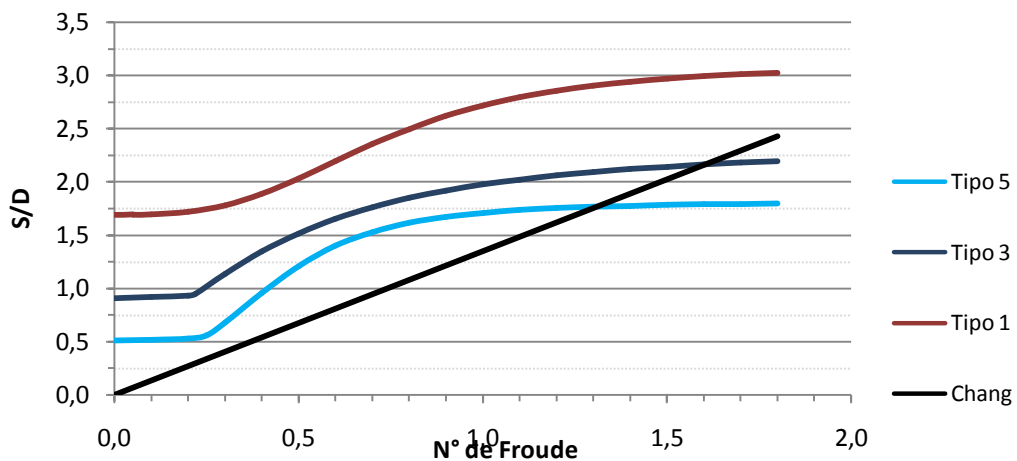
Figura 34 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Jain e Raju



(fonte: elaborado pela autora)

O dimensionamento de Chang¹⁹ (1979 apud KNAUSS, 1987b) ficou muito aquém do desejado para os dados deste trabalho. É possível ver, na figura 35, que somente a partir do Número de Froude 1,6 e S/D em torno de 2,20 é que a reta do autor entra numa área segura na qual os vórtices são incipientes (área do tipo 1 ao 3). Todo os valores para Número de Froude de 0 até 1,6 e S/D de 0 até 2,20 estão em uma área onde se tem vórtices de bloqueio e críticos. O dimensionamento do autor tem valores muito abaixo dos obtidos no presente trabalho para o limite de vórtices tipo 3 apesar de também ter sido desenvolvido para tomadas de captação vertical.

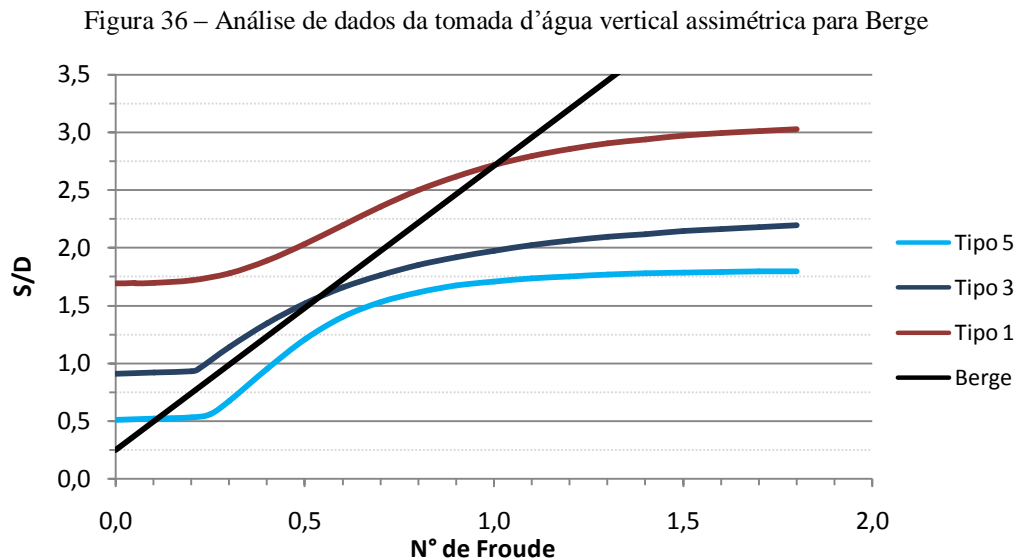
Figura 35 – Análise de dados da tomada vertical d'água assimétrica para Chang



(fonte: elaborado pela autora)

¹⁹ CHANG, E. Experimental data on the hydraulic design of intakes and rectangular pump sumps. **British Hydromechanics Research Association Report**, n. 1518, jan. 1979. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

É possível ver na figura 36 que o dimensionamento de Berge²⁰ (1966 apud KNAUSS, 1987b) está aquém do esperado até Número de Froude em torno de 0,5 e S/D igual a 1,5. Nessa área a reta do autor se encontra na região de vórtices críticos que são prejudiciais para a tomada d'água. Após, aumentando o Número de Froude a partir de 0,5 e aumentando S/D a partir de 1,5 a reta do autor entra na área de vórtices incipientes onde está bem dimensionada e os dados do presente trabalho se tornam próximos dos dados do autor.

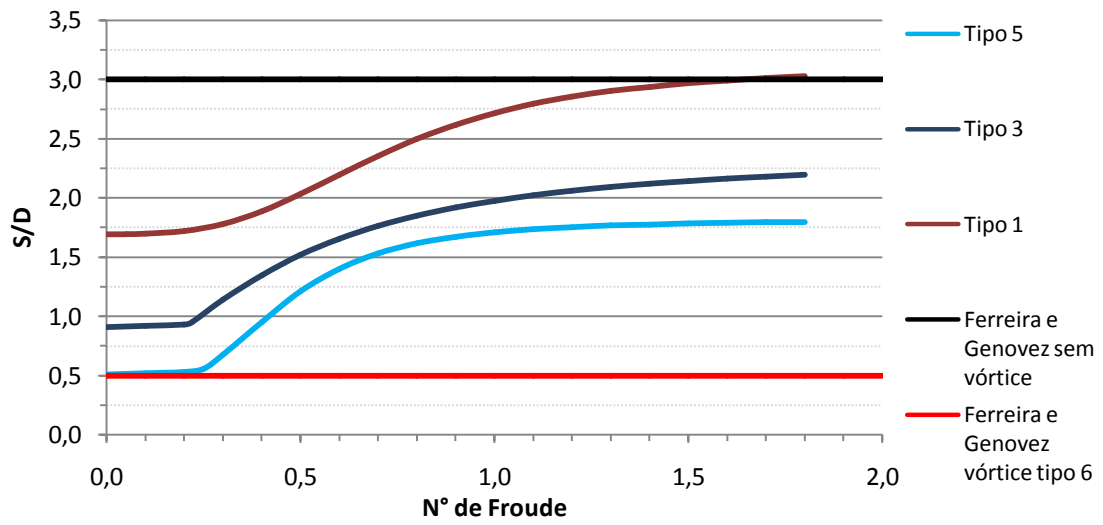


(fonte: elaborado pela autora)

Por último, para Ferreira e Genovez (2005), é possível ver na figura 37 que os valores encontrados pelos autores são condizentes com os valores encontrados no presente trabalho. A linha dos autores para não formação de vórtices está acima da linha tipo 1 que também limita a não formação de vórtices no trabalho e a mesma análise é feita para a linha de vórtices tipo 6 dos autores que condiz com a área de vórtices de bloqueio do trabalho.

²⁰ 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. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

Figura 37 – Análise de dados da tomada d'água vertical assimétrica para Ferreira e Genovez



(fonte: elaborado pela autora)

7 CONCLUSÕES

O estudo de formação de vórtices é bastante complexo não se obtendo um consenso sobre o tema. Para os engenheiros o estudo em modelo experimental é de suma importância, pois tem a capacidade de orientar e ajudar a prever o aparecimento dos vórtices ainda na fase de projeto. Entretanto, para o estudo em modelos deve-se verificar se o efeito das forças viscosas e tensões superficiais podem ser desprezados analisando os números de Reynolds, Reynolds radial e Weber já que o aparecimento das forças viscosas e tensões superficiais estão vinculados a estes números. Recomenda-se que o número de Weber esteja acima de 120, Reynolds radial acima de 50000 e Reynolds acima de 30000. Neste trabalho foram encontrados alguns valores abaixo dos valores mínimos a serem considerados para região de número de Froude $< 0,3$, este fato leva a se analisar os resultados nessa faixa com mais atenção.

Para resolver o problema de formação de vórtices normalmente são feitos estudos em modelos que operam segundo a semelhança de Froude. Para este trabalho foi utilizado um modelo experimental, cujas variáveis analisadas foram S/D e também o número de Froude. Para facilitar a interpretação dos resultados, os vórtices foram divididos em quatro áreas, sendo elas, sem vórtices, vórtices incipientes (entre tipo 1 e 3), vórtices críticos (entre tipo 3 e 5) e vórtices de bloqueio (tipo 6). De acordo com a classificação de Padmanabhan e Hecker (1983) foram estabelecidas faixas de número de Froude e S/D para cada tipo de vórtice.

Posteriormente, analisando autores estudados na bibliografia, alguns tiveram resultados bem próximos aos encontrados no presente trabalho, alguns valores muito superiores e outros valores que não são condizentes com os encontrados no trabalho. Para as tomadas d'água verticais os valores encontrados por Knauss (1987) condizem com os deste trabalho. Para Froude $< 1,5$ a reta do autor se encontra na faixa de vórtices incipientes. Para Berge²¹ (1966 apud KNAUSS, 1987) a faixa que se encontra na área de vórtices incipientes é para número

²¹ 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. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

de Froude entre 0,2 e 0,6. Já para Chang²² (1979 apud KNAUSS, 1987) a faixa da reta que se encontra na área de vórtices incipientes é para número de Froude entre 0,2 e 0,5. Jain e Raju (1978) encontraram valores muito superiores aos encontrados no presente trabalho o que causaria um superdimensionamento para tomadas d'água de usinas hidrelétricas. E por fim, para Ferreira e Genovez (2005) encontraram valores bastante próximos ao presente trabalho, para número de Froude $< 0,2$ os autores admitiram ocorrência de vórtices tipo 6 o que ocorre também no modelo experimental, e também, delimitaram não ocorrência de vórtices para número de Froude $> 1,5$ que condiz com a área sem vórtices delimitada no trabalho.

Foi determinado ainda, para o presente trabalho, um vórtice que se apresentou diferente da classificação de Padmanabhan e Hecker (1983), em formato cilíndrico, denominado aqui como vórtice tipo 6*, nomeando o mesmo de vórtice tulipa por se assemelhar ao comportamento de um vertedouro tipo tulipa.

É importante ressaltar que os dados obtidos nesse trabalho são para a condição de tomada vertical de aproximação assimétrica e são válidos para os intervalos de medição empregados. Portanto, para a utilização desses dados, deve-se analisar as relações nas análises feitas e comparações com a bibliografia.

Para estudos futuros, é recomendado realizar estudos experimentais em modelos onde o escoamento possa ser visualizado no interior da tomada d'água (tubulação em acrílico). Pois pode-se observar se há arraste de bolhas de ar para dentro da tomada, permitindo uma melhor classificação dos vórtices.

Na continuação desta pesquisa, novos estudos deverão ser feitos, considerando as outras duas tomadas d'água de captação horizontal, com aproximação simétrica e assimétrica. Desta forma possibilitará uma melhor análise da formação de vórtices e observando quais influências o tipo de captação e aproximação exercem sobre a formação de vórtices.

²² CHANG, E. Experimental data on the hydraulic design of intakes and rectangular pump sumps. **British Hydromechanics Research Association Report**, n. 1518, jan. 1979. → As demais informações referentes a esta obra não foram disponibilizadas pelo autor lido.

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. 1987). **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 5, p. 703-706, 1989.
- 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, 1992.
- 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.; 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.
- ITAIPU BINACIONAL. **Tomada d'água**. Foz do Iguaçu, 2012. Disponível em: <<http://www.itaipu.gov.br/energia/tomada-d%E2%80%99agua>> Acesso em: 14 jun. de 2013.
- JAIN, A. K.; RAJU, K. G. R. Vortex formation at vertical pipe intakes. **Journal of Hydraulic Division**, v. 104, n 10, p. 1429-1445, 1978.
- KNAUSS, J. Introduction. In: _____ (Coord.;Ed.). **Swirling Flow Problems at Intakes**. Rotterdam: Balkema, 1987a. p. 1-12.
- KNAUSS, J. Prediction of critical submergence. In: _____ (Coord.;Ed.). **Swirling Flow Problems at Intakes**. Rotterdam: Balkema, 1987b. p. 57-76.

NOVA Avanhandava II. **Blogspot**. Corumbá, MS, 2010. Disponível em:
<<http://memoriasdeumsessenta.blogspot.com.br/2010/09/nova-avanhandava-ii.html>>.
Acesso em: 14 ago. 2013.

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

PROMON ENGENHARIA. **Usina hidrelétrica de Itaipu**. São Paulo, 2012. Disponível em:
<<http://www.promonengenharia.com.br/pt-br/projetos/Paginas/usina-hidreletrica-de-itaipu.aspx>> Acesso em: 14 jun. 2013.

SCHREIBER, G. P. **Usinas hidrelétricas**. São Paulo: Edgard Blücher; Rio de Janeiro: ENGEVIX, 1977.

**APÊNDICE A – Dados obtidos nos ensaios da tomada d'água vertical
assimétrica**

DADOS OBTIDOS NOS ENSAIOS DO MODELO EXPERIMENTAL

A tabela inserida aqui se trata dos dados obtidos e calculados nos ensaios do modelo experimental na tomada de água vertical assimétrica. Foram analisados os tipos de vórtices, a vazão e a velocidade do escoamento na tomada d'água, S/D que é a submergência dividida pelo diâmetro, S que é a submergência, Número de Froude, Número de Reynolds, Reynolds radial (nomeado na tabela como Re_r) e C que é o coeficiente de aproximação (já definido anteriormente no presente trabalho).

Tabela 1 – Tabela de dados obtidos nos ensaios do modelo experimental

Q (l/s)	Q (m ³ /s)	S/D	S (m)	V (m/s)	Froude	Vórtice tipo	Reynolds	Weber	Re _r	C
0,39	0,00039	0,25	0,024	0,052	0,053	6*	5,03E+03	3,62E+00	1,58E+04	0,075
0,78	0,00078	0,25	0,024	0,104	0,106	6*	1,01E+04	1,45E+01	3,16E+04	0,150
1,17	0,00117	0,25	0,024	0,156	0,159	6*	1,51E+04	3,26E+01	4,74E+04	0,225
1,56	0,00156	0,25	0,024	0,208	0,212	6*	2,01E+04	5,79E+01	6,32E+04	0,300
1,94	0,00194	0,25	0,024	0,258	0,264	6*	2,50E+04	8,95E+01	7,86E+04	0,373
2,33	0,00233	0,25	0,024	0,310	0,317	6*	3,00E+04	1,29E+02	9,44E+04	0,448
2,72	0,00272	0,25	0,024	0,362	0,370	6*	3,51E+04	1,76E+02	1,10E+05	0,523
3,11	0,00311	0,25	0,024	0,414	0,423	6*	4,01E+04	2,30E+02	1,26E+05	0,598
3,50	0,00350	0,25	0,024	0,466	0,476	6*	4,51E+04	2,91E+02	1,42E+05	0,673
3,89	0,00389	0,25	0,024	0,518	0,529	6*	5,01E+04	3,60E+02	1,58E+05	0,748
3,85	0,00385	0,50	0,049	0,512	0,523	6	4,96E+04	3,53E+02	1,56E+05	0,523
4,40	0,00440	0,50	0,049	0,586	0,598	6	5,67E+04	4,61E+02	1,78E+05	0,598
4,95	0,00495	0,50	0,049	0,659	0,673	6	6,38E+04	5,83E+02	2,00E+05	0,673
5,50	0,00550	0,50	0,049	0,732	0,748	6	7,09E+04	7,20E+02	2,23E+05	0,748
4,67	0,00467	1,00	0,098	0,622	0,635	6	6,02E+04	5,19E+02	1,89E+05	0,449
5,44	0,00544	1,00	0,098	0,724	0,739	6	7,01E+04	7,04E+02	2,20E+05	0,523
6,22	0,00622	1,00	0,098	0,828	0,845	6	8,02E+04	9,21E+02	2,52E+05	0,598
7,00	0,00700	1,00	0,098	0,932	0,952	6	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,673
7,78	0,00778	1,00	0,098	1,036	1,058	6	1,00E+05	1,44E+03	3,15E+05	0,748
5,22	0,00522	1,25	0,122	0,695	0,710	6	6,73E+04	6,48E+02	2,11E+05	0,449
6,09	0,00609	1,25	0,122	0,811	0,828	6	7,85E+04	8,82E+02	2,47E+05	0,524
6,96	0,00696	1,25	0,122	0,926	0,946	6	8,97E+04	1,15E+03	2,82E+05	0,598
7,83	0,00783	1,25	0,122	1,042	1,064	6	1,01E+05	1,46E+03	3,17E+05	0,673
8,70	0,00870	1,25	0,122	1,158	1,183	6	1,12E+05	1,80E+03	3,52E+05	0,748
9,53	0,00953	1,50	0,147	1,269	1,295	6	1,23E+05	2,16E+03	3,86E+05	0,748
3,41	0,00341	0,30	0,029	0,454	0,464	6	4,40E+04	2,77E+02	1,38E+05	0,598
3,83	0,00383	0,30	0,029	0,510	0,521	6	4,94E+04	3,49E+02	1,55E+05	0,672
3,44	0,00344	0,40	0,039	0,458	0,468	6	4,43E+04	2,82E+02	1,39E+05	0,523
3,94	0,00394	0,40	0,039	0,524	0,536	6	5,08E+04	3,69E+02	1,60E+05	0,599
4,43	0,00443	0,40	0,039	0,590	0,602	6	5,71E+04	4,67E+02	1,79E+05	0,673
4,92	0,00492	0,40	0,039	0,655	0,669	6	6,34E+04	5,76E+02	1,99E+05	0,748
12,50	0,01250	1,55	0,152	1,664	1,699	6	1,61E+05	3,72E+03	5,06E+05	0,964
12,00	0,01200	1,55	0,152	1,597	1,631	6	1,55E+05	3,43E+03	4,86E+05	0,925
11,00	0,01100	1,53	0,150	1,464	1,495	6	1,42E+05	2,88E+03	4,45E+05	0,854
10,00	0,01000	1,54	0,151	1,331	1,359	6	1,29E+05	2,38E+03	4,05E+05	0,774
9,00	0,00900	1,54	0,151	1,198	1,223	6	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,696
7,00	0,00700	1,54	0,151	0,932	0,952	6	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,541
6,00	0,00600	1,53	0,150	0,799	0,816	6	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,466
5,00	0,00500	1,53	0,150	0,666	0,680	6	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,388
9,30	0,00930	1,02	0,100	1,238	1,264	6	1,20E+05	2,06E+03	3,77E+05	0,884
9,00	0,00900	1,02	0,100	1,198	1,223	6	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,855
8,00	0,00800	1,02	0,100	1,065	1,087	6	1,03E+05	1,52E+03	3,24E+05	0,760
7,00	0,00700	1,02	0,100	0,932	0,952	6	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,665
6,00	0,00600	1,01	0,099	0,799	0,816	6	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,573
5,00	0,00500	1,04	0,102	0,666	0,680	6	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,471
3,00	0,00300	0,52	0,051	0,399	0,408	6	3,87E+04	2,14E+02	1,21E+05	0,399
4,00	0,00400	0,53	0,052	0,532	0,544	6	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,527

continua...

...continuação

Q (l/s)	Q (m³/s)	S/D	S (m)	V (m/s)	Froude	Vórtice tipo	Reynolds	Weber	Re _r	C
5,00	0,00500	0,52	0,051	0,666	0,680	6	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,666
6,00	0,00600	0,52	0,051	0,799	0,816	6	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,799
7,00	0,00700	0,53	0,052	0,932	0,952	6	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,923
11,04	0,01104	1,79	0,175	1,470	1,501	6	1,42E+05	2,90E+03	4,47E+05	0,793
11,99	0,01199	1,79	0,175	1,596	1,630	6	1,55E+05	3,42E+03	4,86E+05	0,862
8,02	0,00802	1,53	0,150	1,068	1,090	6	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	0,622
8,02	0,00802	1,02	0,100	1,068	1,090	6	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	0,762
11,04	0,01104	1,02	0,100	1,470	1,501	6	1,42E+05	2,90E+03	4,47E+05	1,049
3,97	0,00397	0,77	0,075	0,528	0,540	6	5,12E+04	3,75E+02	1,61E+05	0,436
8,02	0,00802	0,51	0,050	1,068	1,090	6	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	1,078
11,04	0,01104	0,51	0,050	1,470	1,501	6	1,42E+05	2,90E+03	4,47E+05	1,484
4,04	0,00404	0,75	0,073	0,538	0,549	6	5,21E+04	3,88E+02	1,64E+05	0,448
4,71	0,00471	0,75	0,073	0,627	0,640	6	6,07E+04	5,28E+02	1,91E+05	0,523
5,39	0,00539	0,75	0,073	0,717	0,733	6	6,95E+04	6,91E+02	2,18E+05	0,598
6,06	0,00606	0,75	0,073	0,807	0,824	6	7,81E+04	8,74E+02	2,45E+05	0,673
6,74	0,00674	0,75	0,073	0,897	0,916	6	8,69E+04	1,08E+03	2,73E+05	0,748
3,00	0,00300	0,50	0,049	0,399	0,408	6	3,87E+04	2,14E+02	1,21E+05	0,408
4,00	0,00400	0,50	0,049	0,532	0,544	6	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,544
5,00	0,00500	0,50	0,049	0,666	0,680	6	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,680
6,00	0,00600	0,50	0,049	0,799	0,816	6	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,816
4,00	0,00400	1,00	0,098	0,532	0,544	6	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,384
5,00	0,00500	1,00	0,098	0,666	0,680	6	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,481
6,00	0,00600	1,00	0,098	0,799	0,816	6	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,577
7,00	0,00700	1,00	0,098	0,932	0,952	6	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,673
8,00	0,00800	1,00	0,098	1,065	1,087	6	1,03E+05	1,52E+03	3,24E+05	0,769
9,00	0,00900	1,00	0,098	1,198	1,223	6	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,865
9,00	0,00900	1,50	0,147	1,198	1,223	6	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,706
2,20	0,00220	0,50	0,049	0,293	0,299	5	2,84E+04	1,15E+02	8,91E+04	0,299
2,75	0,00275	0,50	0,049	0,366	0,374	5	3,54E+04	1,80E+02	1,11E+05	0,374
3,30	0,00330	0,50	0,049	0,439	0,449	5	4,25E+04	2,59E+02	1,34E+05	0,449
3,11	0,00311	1,00	0,098	0,414	0,423	5	4,01E+04	2,30E+02	1,26E+05	0,299
3,89	0,00389	1,00	0,098	0,518	0,529	5	5,01E+04	3,60E+02	1,58E+05	0,374
3,48	0,00348	1,25	0,122	0,463	0,473	5	4,49E+04	2,88E+02	1,41E+05	0,299
4,35	0,00435	1,25	0,122	0,579	0,591	5	5,61E+04	4,50E+02	1,76E+05	0,374
7,62	0,00762	1,50	0,147	1,014	1,036	5	9,82E+04	1,38E+03	3,09E+05	0,598
8,57	0,00857	1,50	0,147	1,141	1,165	5	1,10E+05	1,75E+03	3,47E+05	0,673
9,26	0,00926	1,75	0,171	1,233	1,259	5	1,19E+05	2,04E+03	3,75E+05	0,673
10,29	0,01029	1,75	0,171	1,370	1,399	5	1,33E+05	2,52E+03	4,17E+05	0,748
1,70	0,00170	0,30	0,029	0,226	0,231	5	2,19E+04	6,88E+01	6,88E+04	0,298
2,13	0,00213	0,30	0,029	0,284	0,290	5	2,75E+04	1,08E+02	8,63E+04	0,374
2,56	0,00256	0,30	0,029	0,341	0,348	5	3,30E+04	1,56E+02	1,04E+05	0,449
2,98	0,00298	0,30	0,029	0,397	0,405	5	3,84E+04	2,11E+02	1,21E+05	0,523
1,97	0,00197	0,40	0,039	0,262	0,268	5	2,54E+04	9,23E+01	7,98E+04	0,299
2,46	0,00246	0,40	0,039	0,327	0,334	5	3,17E+04	1,44E+02	9,96E+04	0,374
2,95	0,00295	0,40	0,039	0,393	0,401	5	3,80E+04	2,07E+02	1,19E+05	0,448
11,00	0,01100	2,04	0,200	1,464	1,495	5	1,42E+05	2,88E+03	4,45E+05	0,739
4,00	0,00400	1,54	0,151	0,532	0,544	5	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,309

continua...

...continuação

Q (l/s)	Q (m ³ /s)	S/D	S (m)	V (m/s)	Froude	Vórtice tipo	Reynolds	Weber	Re _r	C
4,00	0,00400	1,03	0,101	0,532	0,544	5	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,378
2,00	0,00200	0,53	0,052	0,266	0,272	5	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,264
8,02	0,00802	1,79	0,175	1,068	1,090	5	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	0,576
8,98	0,00898	1,79	0,175	1,195	1,221	5	1,16E+05	1,92E+03	3,64E+05	0,645
12,00	0,01200	1,79	0,175	1,597	1,631	5	1,55E+05	3,43E+03	4,86E+05	0,862
3,02	0,00302	1,28	0,125	0,402	0,411	5	3,89E+04	2,17E+02	1,22E+05	0,257
3,02	0,00302	0,77	0,075	0,402	0,411	5	3,89E+04	2,17E+02	1,22E+05	0,331
2,69	0,00269	0,75	0,073	0,358	0,366	5	3,47E+04	1,72E+02	1,09E+05	0,299
3,37	0,00337	0,75	0,073	0,449	0,458	5	4,34E+04	2,70E+02	1,36E+05	0,374
2,00	0,00200	0,50	0,049	0,266	0,272	5	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,272
3,00	0,00300	1,00	0,098	0,399	0,408	5	3,87E+04	2,14E+02	1,21E+05	0,288
2,33	0,00233	1,00	0,098	0,310	0,317	4	3,00E+04	1,29E+02	9,44E+04	0,224
6,67	0,00667	1,50	0,147	0,888	0,907	4	8,60E+04	1,06E+03	2,70E+05	0,523
3,00	0,00300	1,00	0,098	0,399	0,408	4	3,87E+04	2,14E+02	1,21E+05	0,288
4,00	0,00400	1,00	0,098	0,532	0,544	4	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,384
1,65	0,00165	0,50	0,049	0,220	0,224	3	2,13E+04	6,48E+01	6,68E+04	0,224
1,56	0,00156	1,00	0,098	0,208	0,212	3	2,01E+04	5,79E+01	6,32E+04	0,150
2,61	0,00261	1,25	0,122	0,347	0,355	3	3,36E+04	1,62E+02	1,06E+05	0,224
5,72	0,00572	1,50	0,147	0,761	0,778	3	7,37E+04	7,78E+02	2,32E+05	0,449
8,23	0,00823	1,75	0,171	1,096	1,119	3	1,06E+05	1,61E+03	3,33E+05	0,598
1,28	0,00128	0,30	0,029	0,170	0,174	3	1,65E+04	3,90E+01	5,18E+04	0,225
1,48	0,00148	0,40	0,039	0,197	0,201	3	1,91E+04	5,21E+01	5,99E+04	0,225
12,40	0,01240	2,06	0,201	1,651	1,686	3	1,60E+05	3,66E+03	5,02E+05	0,831
10,00	0,01000	2,07	0,202	1,331	1,359	3	1,29E+05	2,38E+03	4,05E+05	0,669
9,00	0,00900	2,07	0,202	1,198	1,223	3	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,602
8,00	0,00800	2,02	0,198	1,065	1,087	3	1,03E+05	1,52E+03	3,24E+05	0,540
3,00	0,00300	1,54	0,151	0,399	0,408	3	3,87E+04	2,14E+02	1,21E+05	0,232
2,00	0,00200	1,54	0,151	0,266	0,272	3	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,155
2,00	0,00200	1,05	0,103	0,266	0,272	3	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,187
2,00	0,00200	1,05	0,103	0,266	0,272	3	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,187
6,03	0,00603	1,79	0,175	0,803	0,820	3	7,77E+04	8,65E+02	2,44E+05	0,433
6,99	0,00699	1,79	0,175	0,930	0,950	3	9,01E+04	1,16E+03	2,83E+05	0,502
1,99	0,00199	0,77	0,075	0,265	0,271	3	2,57E+04	9,42E+01	8,06E+04	0,218
2,00	0,00200	1,00	0,098	0,266	0,272	3	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,192
4,76	0,00476	1,50	0,147	0,634	0,647	3	6,14E+04	5,39E+02	1,93E+05	0,374
2,02	0,00202	0,75	0,073	0,269	0,275	3	2,60E+04	9,71E+01	8,18E+04	0,224
2,00	0,00200	1,00	0,098	0,266	0,272	3	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,192
5,00	0,00500	1,50	0,147	0,666	0,680	3	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,392
7,00	0,00700	1,50	0,147	0,932	0,952	3	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,549
0,55	0,00055	0,50	0,049	0,073	0,075	2	7,09E+03	7,20E+00	2,23E+04	0,075
1,10	0,00110	0,50	0,049	0,146	0,150	2	1,42E+04	2,88E+01	4,45E+04	0,150
0,78	0,00078	1,00	0,098	0,104	0,106	2	1,01E+04	1,45E+01	3,16E+04	0,075
1,74	0,00174	1,25	0,122	0,232	0,237	2	2,24E+04	7,20E+01	7,05E+04	0,150
2,86	0,00286	1,50	0,147	0,381	0,389	2	3,69E+04	1,95E+02	1,16E+05	0,224
3,81	0,00381	1,50	0,147	0,507	0,518	2	4,91E+04	3,45E+02	1,54E+05	0,299
4,76	0,00476	1,50	0,147	0,634	0,647	2	6,14E+04	5,39E+02	1,93E+05	0,374
5,14	0,00514	1,75	0,171	0,684	0,699	2	6,63E+04	6,29E+02	2,08E+05	0,373
6,17	0,00617	1,75	0,171	0,821	0,839	2	7,95E+04	9,06E+02	2,50E+05	0,448

continua...

...continuação

Q (l/s)	Q (m ³ /s)	S/D	S (m)	V (m/s)	Froude	Vórtice tipo	Reynolds	Weber	Re _r	C
7,20	0,00720	1,75	0,171	0,958	0,979	2	9,28E+04	1,23E+03	2,92E+05	0,523
6,60	0,00660	2,00	0,196	0,879	0,897	2	8,51E+04	1,04E+03	2,67E+05	0,449
7,70	0,00770	2,00	0,196	1,025	1,047	2	9,93E+04	1,41E+03	3,12E+05	0,523
8,80	0,00880	2,00	0,196	1,171	1,196	2	1,13E+05	1,84E+03	3,56E+05	0,598
9,90	0,00990	2,00	0,196	1,318	1,346	2	1,28E+05	2,33E+03	4,01E+05	0,673
7,00	0,00700	2,25	0,220	0,932	0,952	2	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,449
8,17	0,00817	2,25	0,220	1,088	1,111	2	1,05E+05	1,59E+03	3,31E+05	0,524
9,33	0,00933	2,25	0,220	1,242	1,268	2	1,20E+05	2,07E+03	3,78E+05	0,598
10,50	0,01050	2,25	0,220	1,398	1,427	2	1,35E+05	2,62E+03	4,25E+05	0,673
0,43	0,00043	0,30	0,029	0,057	0,058	2	5,54E+03	4,40E+00	1,74E+04	0,075
0,85	0,00085	0,30	0,029	0,113	0,116	2	1,10E+04	1,72E+01	3,44E+04	0,149
0,49	0,00049	0,40	0,039	0,065	0,067	2	6,32E+03	5,71E+00	1,98E+04	0,074
0,98	0,00098	0,40	0,039	0,130	0,133	2	1,26E+04	2,29E+01	3,97E+04	0,149
12,40	0,01240	2,08	0,203	1,651	1,686	2	1,60E+05	3,66E+03	5,02E+05	0,827
12,00	0,01200	2,04	0,200	1,597	1,631	2	1,55E+05	3,43E+03	4,86E+05	0,807
7,00	0,00700	2,04	0,200	0,932	0,952	2	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,470
1,00	0,00100	1,02	0,100	0,133	0,136	2	1,29E+04	2,38E+01	4,05E+04	0,095
1,00	0,00100	0,51	0,050	0,133	0,136	2	1,29E+04	2,38E+01	4,05E+04	0,134
5,00	0,00500	1,79	0,175	0,666	0,680	2	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,359
1,03	0,00103	1,53	0,150	0,137	0,140	2	1,33E+04	2,52E+01	4,17E+04	0,080
0,67	0,00067	0,75	0,073	0,089	0,091	2	8,64E+03	1,07E+01	2,71E+04	0,074
1,35	0,00135	0,75	0,073	0,180	0,184	2	1,74E+04	4,34E+01	5,47E+04	0,150
9,00	0,00900	2,00	0,196	1,198	1,223	2	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,612
0,87	0,00087	1,25	0,122	0,116	0,118	1	1,12E+04	1,80E+01	3,52E+04	0,075
0,95	0,00095	1,50	0,147	0,126	0,129	1	1,22E+04	2,15E+01	3,85E+04	0,075
1,91	0,00191	1,50	0,147	0,254	0,260	1	2,46E+04	8,68E+01	7,73E+04	0,150
2,06	0,00206	1,75	0,171	0,274	0,280	1	2,66E+04	1,01E+02	8,34E+04	0,150
3,09	0,00309	1,75	0,171	0,411	0,420	1	3,98E+04	2,27E+02	1,25E+05	0,225
4,12	0,00412	1,75	0,171	0,548	0,560	1	5,31E+04	4,04E+02	1,67E+05	0,299
3,30	0,00330	2,00	0,196	0,439	0,449	1	4,25E+04	2,59E+02	1,34E+05	0,224
4,40	0,00440	2,00	0,196	0,586	0,598	1	5,67E+04	4,61E+02	1,78E+05	0,299
5,50	0,00550	2,00	0,196	0,732	0,748	1	7,09E+04	7,20E+02	2,23E+05	0,374
4,67	0,00467	2,25	0,220	0,622	0,635	1	6,02E+04	5,19E+02	1,89E+05	0,299
5,83	0,00583	2,25	0,220	0,776	0,792	1	7,51E+04	8,09E+02	2,36E+05	0,374
6,15	0,00615	2,50	0,245	0,819	0,836	1	7,93E+04	9,00E+02	2,49E+05	0,374
7,38	0,00738	2,50	0,245	0,982	1,003	1	9,51E+04	1,30E+03	2,99E+05	0,449
8,61	0,00861	2,50	0,245	1,146	1,170	1	1,11E+05	1,76E+03	3,49E+05	0,523
9,84	0,00984	2,50	0,245	1,310	1,338	1	1,27E+05	2,30E+03	3,98E+05	0,598
7,74	0,00774	2,75	0,269	1,030	1,052	1	9,98E+04	1,43E+03	3,13E+05	0,449
9,03	0,00903	2,75	0,269	1,202	1,227	1	1,16E+05	1,94E+03	3,66E+05	0,523
9,43	0,00943	3,00	0,293	1,255	1,282	1	1,22E+05	2,12E+03	3,82E+05	0,523
6,00	0,00600	2,07	0,202	0,799	0,816	1	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,401
5,00	0,00500	2,02	0,198	0,666	0,680	1	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,338
8,02	0,00802	2,04	0,200	1,068	1,090	1	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	0,539
10,00	0,01000	2,50	0,245	1,331	1,359	1	1,29E+05	2,38E+03	4,05E+05	0,608
11,00	0,01100	2,50	0,245	1,464	1,495	1	1,42E+05	2,88E+03	4,45E+05	0,669
12,00	0,01200	2,50	0,245	1,597	1,631	1	1,55E+05	3,43E+03	4,86E+05	0,729
2,00	0,00200	1,50	0,147	0,266	0,272	1	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,157

continua...

...continuação

Q (l/s)	Q (m ³ /s)	S/D	S (m)	V (m/s)	Froude	Vórtice tipo	Reynolds	Weber	Re _r	C
4,00	0,00400	2,50	0,245	0,532	0,544	1	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,243
5,00	0,00500	2,50	0,245	0,666	0,680	1	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,304
6,00	0,00600	2,50	0,245	0,799	0,816	1	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,365
7,00	0,00700	2,50	0,245	0,932	0,952	1	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,426
8,00	0,00800	2,50	0,245	1,065	1,087	1	1,03E+05	1,52E+03	3,24E+05	0,486
9,00	0,00900	2,50	0,245	1,198	1,223	1	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,547
2,00	0,00200	2,00	0,196	0,266	0,272	1	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,136
3,00	0,00300	2,00	0,196	0,399	0,408	1	3,87E+04	2,14E+02	1,21E+05	0,204
4,00	0,00400	2,00	0,196	0,532	0,544	1	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,272
5,00	0,00500	2,00	0,196	0,666	0,680	1	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,340
6,00	0,00600	2,00	0,196	0,799	0,816	1	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,408
7,00	0,00700	2,00	0,196	0,932	0,952	1	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,476
8,00	0,00800	2,00	0,196	1,065	1,087	1	1,03E+05	1,52E+03	3,24E+05	0,544
6,00	0,00600	3,00	0,293	0,799	0,816	1	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,333
7,00	0,00700	3,00	0,293	0,932	0,952	1	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,388
8,00	0,00800	3,00	0,293	1,065	1,087	1	1,03E+05	1,52E+03	3,24E+05	0,444
9,00	0,00900	3,00	0,293	1,198	1,223	1	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,499
4,00	0,00400	3,00	0,293	0,532	0,544	0	5,16E+04	3,81E+02	1,62E+05	0,222
5,00	0,00500	3,00	0,293	0,666	0,680	0	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,277
1,03	0,00103	1,75	0,171	0,137	0,140	0	1,33E+04	2,52E+01	4,17E+04	0,075
1,10	0,00110	2,00	0,196	0,146	0,150	0	1,42E+04	2,88E+01	4,45E+04	0,075
2,20	0,00220	2,00	0,196	0,293	0,299	0	2,84E+04	1,15E+02	8,91E+04	0,150
1,17	0,00117	2,25	0,220	0,156	0,159	0	1,51E+04	3,26E+01	4,74E+04	0,075
2,33	0,00233	2,25	0,220	0,310	0,317	0	3,00E+04	1,29E+02	9,44E+04	0,149
3,50	0,00350	2,25	0,220	0,466	0,476	0	4,51E+04	2,91E+02	1,42E+05	0,224
1,23	0,00123	2,50	0,245	0,164	0,167	0	1,59E+04	3,60E+01	4,98E+04	0,075
2,46	0,00246	2,50	0,245	0,327	0,334	0	3,17E+04	1,44E+02	9,96E+04	0,150
3,69	0,00369	2,50	0,245	0,491	0,502	0	4,76E+04	3,24E+02	1,49E+05	0,224
4,92	0,00492	2,50	0,245	0,655	0,669	0	6,34E+04	5,76E+02	1,99E+05	0,299
1,29	0,00129	2,75	0,269	0,172	0,175	0	1,66E+04	3,96E+01	5,22E+04	0,075
2,58	0,00258	2,75	0,269	0,343	0,351	0	3,33E+04	1,58E+02	1,04E+05	0,150
3,87	0,00387	2,75	0,269	0,515	0,526	0	4,99E+04	3,56E+02	1,57E+05	0,224
5,16	0,00516	2,75	0,269	0,687	0,701	0	6,65E+04	6,34E+02	2,09E+05	0,299
6,45	0,00645	2,75	0,269	0,859	0,877	0	8,31E+04	9,90E+02	2,61E+05	0,374
1,35	0,00135	3,00	0,293	0,180	0,184	0	1,74E+04	4,34E+01	5,47E+04	0,075
2,69	0,00269	3,00	0,293	0,358	0,366	0	3,47E+04	1,72E+02	1,09E+05	0,149
4,04	0,00404	3,00	0,293	0,538	0,549	0	5,21E+04	3,88E+02	1,64E+05	0,224
5,39	0,00539	3,00	0,293	0,717	0,733	0	6,95E+04	6,91E+02	2,18E+05	0,299
6,74	0,00674	3,00	0,293	0,897	0,916	0	8,69E+04	1,08E+03	2,73E+05	0,374
8,08	0,00808	3,00	0,293	1,076	1,098	0	1,04E+05	1,55E+03	3,27E+05	0,448
12,50	0,01250	3,11	0,304	1,664	1,699	0	1,61E+05	3,72E+03	5,06E+05	0,681
11,00	0,01100	2,56	0,250	1,464	1,495	0	1,42E+05	2,88E+03	4,45E+05	0,661
2,00	0,00200	3,07	0,300	0,266	0,272	0	2,58E+04	9,52E+01	8,10E+04	0,110
3,90	0,00390	3,07	0,300	0,519	0,530	0	5,03E+04	3,62E+02	1,58E+05	0,214
5,00	0,00500	3,07	0,300	0,666	0,680	0	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,274
1,03	0,00103	3,07	0,300	0,137	0,140	0	1,33E+04	2,52E+01	4,17E+04	0,057
6,99	0,00699	3,07	0,300	0,930	0,950	0	9,01E+04	1,16E+03	2,83E+05	0,384
3,02	0,00302	3,07	0,300	0,402	0,411	0	3,89E+04	2,17E+02	1,22E+05	0,166
8,02	0,00802	3,07	0,300	1,068	1,090	0	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	0,440

continua...

...continuação

Q (l/s)	Q (m³/s)	S/D	S (m)	V (m/s)	Froude	Vórtice tipo	Reynolds	Weber	Re _r	C
8,98	0,00898	3,07	0,300	1,195	1,221	0	1,16E+05	1,92E+03	3,64E+05	0,493
11,04	0,01104	3,07	0,300	1,470	1,501	0	1,42E+05	2,90E+03	4,47E+05	0,606
11,99	0,01199	3,07	0,300	1,596	1,630	0	1,55E+05	3,42E+03	4,86E+05	0,658
1,03	0,00103	2,56	0,250	0,137	0,140	0	1,33E+04	2,52E+01	4,17E+04	0,062
1,99	0,00199	2,56	0,250	0,265	0,271	0	2,57E+04	9,42E+01	8,06E+04	0,120
3,02	0,00302	2,56	0,250	0,402	0,411	0	3,89E+04	2,17E+02	1,22E+05	0,182
3,97	0,00397	2,56	0,250	0,528	0,540	0	5,12E+04	3,75E+02	1,61E+05	0,239
5,00	0,00500	2,56	0,250	0,666	0,680	0	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,301
6,03	0,00603	2,56	0,250	0,803	0,820	0	7,77E+04	8,65E+02	2,44E+05	0,363
6,99	0,00699	2,56	0,250	0,930	0,950	0	9,01E+04	1,16E+03	2,83E+05	0,420
8,02	0,00802	2,56	0,250	1,068	1,090	0	1,03E+05	1,53E+03	3,25E+05	0,482
8,89	0,00889	2,56	0,250	1,183	1,208	0	1,15E+05	1,88E+03	3,60E+05	0,534
11,04	0,01104	2,30	0,225	1,470	1,501	0	1,42E+05	2,90E+03	4,47E+05	0,700
11,99	0,01199	2,30	0,225	1,596	1,630	0	1,55E+05	3,42E+03	4,86E+05	0,760
1,03	0,00103	2,04	0,200	0,137	0,140	0	1,33E+04	2,52E+01	4,17E+04	0,069
1,99	0,00199	2,04	0,200	0,265	0,271	0	2,57E+04	9,42E+01	8,06E+04	0,134
3,02	0,00302	2,04	0,200	0,402	0,411	0	3,89E+04	2,17E+02	1,22E+05	0,203
3,97	0,00397	2,04	0,200	0,528	0,540	0	5,12E+04	3,75E+02	1,61E+05	0,267
9,00	0,00900	2,50	0,245	1,198	1,223	0	1,16E+05	1,93E+03	3,64E+05	0,547
6,00	0,00600	3,00	0,293	0,799	0,816	0	7,73E+04	8,57E+02	2,43E+05	0,333
5,00	0,00500	3,00	0,293	0,666	0,680	0	6,44E+04	5,95E+02	2,02E+05	0,277
7,00	0,00700	3,00	0,293	0,932	0,952	0	9,02E+04	1,17E+03	2,83E+05	0,388

(fonte: elaborado pela autora)