

196902006

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

Submergência Crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais

Eng^a Laura Maria Canno Ferreira

Campinas

2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**Submergência Crítica na formação de vórtices
em tomadas d'água verticais**

Eng^a. Laura Maria Canno Ferreira

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Ana Inés Borri Genovez

Dissertação apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração de Recursos Hídricos.

Atesto que esta é a versão definitiva da dissertação/tese.	
10/12/2001	
Prof. Dr.	
Matrícula:	054721

Campinas

2001

UNICAMP	
N.º CHAMADA	T/ UNICAMP
	F413s
V.	47689
TOMBO (SC)	837/02
PROD.	
C	☒
D	☒
PREC.	R\$ 11,00
DATA	08-02-02
N.º CPD	

CM00163498-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

F413s Ferreira, Laura Maria Canno
Submergência crítica na formação de vórtices em tomadas
d'água verticais / Laura Maria Canno Ferreira. --
Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Ana Inés Borri Genovez
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

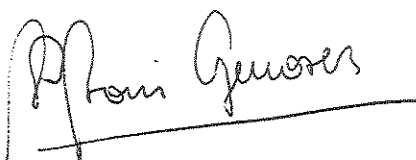
1. Hidráulica - Modelos. 2. Estruturas hidráulicas --
Estudos experimentais. I. Genovez, Ana Inés Borri. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Civil. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL**

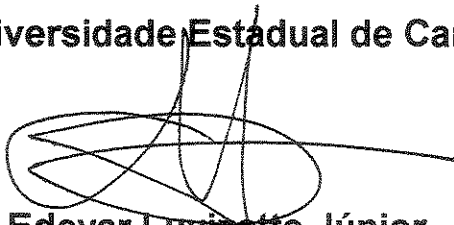
**Submergência Crítica na formação de vórtices
em tomadas d'água verticais**

Eng^a. Laura Maria Canno Ferreira

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:



Prof^a. Dr^a. Ana Inés Borri Genovez
Orientadora – Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Edevar Luvizotto Júnior
Universidade Estadual de Campinas



Prof. Dr. Giorgio Brighetti
Universidade de São Paulo

Campinas, 19 de fevereiro de 2001.

À minha avó Neldina. Não tenho mais
comigo sua presença física, mas seus
ensinamentos continuarão a me acompanhar
e a me guiar pelos caminhos da vida.

AGRADECIMENTOS

À minha mãe, Matilde, pela presença constante em todos os momentos da minha vida.

À minha avó, Neldina, que não teve a chance de ver de perto mais esta etapa alcançada, mas certamente olha por mim onde quer que esteja. Agradeço por fazer de mim o que sou hoje.

À Professora Doutora Ana Inês Borri Genovez, pela orientação e amizade dispensadas durante a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Edevar Luvizotto Junior, pela ajuda prestada.

Ao amigo Daniel, companheiro de todas as horas durante a realização dos ensaios.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos, pelo apoio na montagem dos modelos e na execução dos ensaios.

Aos amigos que me acompanharam durante esses dois anos. Obrigada por compartilhar comigo os bons e os maus momentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento e Pesquisa, pelo financiamento deste trabalho.

“Não quero honrarias
Não almejo ser líder
Só desejo compartilhar
O que encontrei
E mostrar esses novos horizontes...”

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE FOTOS	xiv
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	xvi
RESUMO	xx
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVO	3
3 TRATAMENTO ANALÍTICO	4
3.1 Estudo analítico	4
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
4.1 Tipos de entrada nas tomadas d'água	9
4.2 Revisão bibliográfica	12
4.3 Conclusão	42
5. METODOLOGIA	43
5.1 Banco de ensaio	43
5.2 Equipamentos de medição	45
5.3. Metodologia de ensaio	46
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
6.1 Resultados obtidos	48
6.2 Análise dos resultados	53
6.3 Análise dos parâmetros H/D e número de Reynolds radial	57
6.4 Análise da submergência crítica	61
6.5 Análise do ar arrastado pelos vórtices	66
6.6 Considerações finais	70

7 CONCLUSOES E RECOMENDAÇÕES	71
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ABSTRACT	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1	Paralelepípedo elementar de fluido, segundo PIMENTA (1981).	6
Figura 3.2	Vórtice combinado de Rankine, segundo CASAMASSA NETO (1991).	8
Figura 3.3	Variação da velocidade tangencial, segundo Durgin e Hecker, citados por AOKI (1982).	8
Figura 4.1	Configurações de tomadas horizontais e verticais, segundo GULLIVER, RINDELS e LINDBLOM (1986).	9
Figura 4.2	Tipos de entrada para poços verticais, segundo FALVEY (1980).	10
Figura 4.3	Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, Rio Paraná. (CBGB, 1982)	11
Figura 4.4	Usina Hidrelétrica de Xingó, Rio São Francisco.	11
Figura 4.5	Usina Hidrelétrica de Xavantes, Rio Paranapanema (CBGB, 1982).	12
Figura 4.6	Tomada d'água do tipo "off-stream", (ILYINYKH, 1985).	12
Figura 4.7	Características dos poços de sucção ensaiados por DENNY (1956).	14

Figura 4.8	Curva submergência x velocidade para conduto de 0,200m segundo DENNY (1956).	15
Figura 4.9	Relação entre a altura da tomada em relação ao fundo e a submergência, segundo DENNY (1956).	15
Figura 4.10	Configuração geral das tomadas estudadas por Gordon (1970).	17
Figura 4.11	Limites de submergência mínima para tomadas com aproximação simétrica e lateral, segundo GORDON (1970).	18
Figura 4.12	Gráficos dos pontos obtidos por GORDON (1970) plotados na curva de Denny-Young.	18
Figura 4.13	Gráfico do coeficiente de descarga em função do número de Reynolds, segundo DAGGETT e KEULEGAN (1974).	20
Figura 4.14	Escala de velocidades em função da escala de comprimento para a formação de vórtice com arraste de ar, segundo ZAJDLÍK (1977).	21
Figura 4.15	Escala de velocidades em função da escala de comprimento para a formação de vórtice sem arraste de ar, segundo ZAJDLÍK (1977).	21
Figura 4.16	Esquema do modelo da tomada ensaiada por ANWAR, WELLER e AMPHLET (1978).	23
Figura 4.17	Dependência do parâmetro circulação em função do número de Reynolds radial, segundo ANWAR, WELLER e AMPHLET (1978).	23

Figura 4.18	Influência da tensão superficial sobre o parâmetro circulação, segundo ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978).	24
Figura 4.19	Variação do coeficiente de vazão, em função do parâmetro circulação, segundo ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978).	25
Figura 4.20	Variação do fator de correção da submergência com número de Reynolds e número de Froude, segundo JAIN E RAJU (1978).	26
Figura 4.21	Dispositivos anti-vórtices, segundo MARTIM (1983).	29
Figura 4.22	Tipos de vórtice, segundo PADMANABHAN E HECKER (1983).	30
Figura 4.23	Gráfico da relação S/D em função do número de Froude, segundo GULLIVER, RINDELS E LINDBLOM (1986).	31
Figura 4.24	Resultados do modelo da tomada de água de Segredo, segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986).	33
Figura 4.25	Relação entre classe do vórtice e número de Euler, segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986).	34
Figura 4.26	Dispositivos antivórtice, segundo GULLIVER e ARNDT (1991).	37
Figura 4.27	Típicas superfícies esféricas em tomadas d'água, segundo YILDRIM e KOCABAS (1995).	39
Figura 4.28	Perfil de vórtice com e sem tensão superficial, segundo ALDAPE E REINA (1996).	40

Figura 4.29	Relação entre a vazão e a área da CSSS, segundo YILDIRIM E KOCABAS (1998).	41
Figura 4.30	Gráfico da submergência crítica em função da velocidade na tomada, segundo YILDIRIM E KOCABAS (1998).	41
Figura 5.1	Esquema geral do banco de ensaio.	44
Figura 5.2	Representação esquemática da tomada d'água.	46
Figura 6.1	Gráfico do tipo de vórtice em função da frequência.	53
Figura 6.2	Gráfico do tipo de vórtice formado em função do número de Froude.	55
Figura 6.3.a	Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para os diferentes tipos de vórtice ($D = 0,075\text{m}$).	56
Figura 6.3.b	Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para os diferentes tipos de vórtice ($D = 0,100\text{m}$).	56
Figura 6.3.c	Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para os diferentes tipos de vórtice ($D = 0,125\text{m}$).	57
Figura 6.4.a	Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial para as diferentes relações H/D , para a tomada de $0,075\text{m}$.	58
Figura 6.4.b	Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial para as diferentes relações H/D , para a tomada de $0,100\text{m}$.	58

Figura 6.4.c	Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial para as diferentes relações H/D , para a tomada de 0,125m.	59
Figura 6.5	Gráfico de F em função de Re_{yr} , considerando a formação de vórtice com arraste de ar nas três tomadas.	59
Figura 6.6	Gráfico de F em função de Re_{yr} , considerando a formação de vórtice sem arraste de ar nas três tomadas.	60
Figura 6.7	Gráfico de F em função de Re_{yr} , considerando a não formação de vórtice nas três tomadas.	61
Figura 6.8.a	Gráfico de S/D em função de F para a tomada de diâmetro 0,075m.	62
Figura 6.8.b	Gráfico de S/D em função de F para a tomada de diâmetro 0,100m.	62
Figura 6.8.c	Gráfico de S/D em função de F para a tomada de diâmetro 0,125m.	63
Figura 6.9	Gráfico comparativo de S/D em função do número de Froude.	63
Figura 6.10	Gráfico de S/D em função da velocidade na tomada.	64
Figura 6.11	Relação entre X/D e S/D em função de H/D .	65
Figura 6.12	Gráfico comparativo dos valores de S/D em função da velocidade na tomada.	66

Figura 6.13	Gráfico de β em função do número de Reynolds.	67
Figura 6.14	Desempenho de uma turbina tipo Francis para velocidade constante, segundo BUREAU OF RECLAMATION (1976).	70

LISTA DE FOTOS

Foto 5.1	Foto da tomada d'água vertical instalada dentro do reservatório.	44
Foto 5.2	Campânula montada sobre a tomada de água.	45
Foto 6.1	Foto de vórtice tipo 6, formado na tomada de 0,075m.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1	Descrição dos tipos de vórtice, segundo PADMANABHAN e HECKER (1983).	30
Tabela 4.2	Classificação dos vórtices, segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986).	32
Tabela 6.1.a	Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,075\text{m}$.	49
Tabela 6.1.b	Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,100\text{m}$.	50
Tabela 6.1.c	Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,125\text{m}$.	52
Tabela 6.2	Intervalos de valores dos adimensionais para os diâmetros ensaiados.	54
Tabela 6.3	Vazões de água e ar nas tomadas.	67

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

$\vec{a}$	- aceleração do fluido (LT^{-2})
A	- área da seção transversal da tomada (L^2)
B	- largura do canal (L)
c	- distância da tubulação ao fundo do reservatório ou poço de sucção (L)
$C = \frac{Q}{A\sqrt{2gh}}$	- coeficiente de vazão
C^*	- constante de proporcionalidade
C'	- coeficiente da equação proposta por Gordon
C_d	- coeficiente de vazão da tomada
$\vec{dS}$	- vetor elementar de comprimento
dx, dy e dz	- arestas de um paralelepípedo elementar

D	- diâmetro da tomada (L)
$E = V [2g (S + D/2)]^{1/2}$	- número de Euler
$\vec{f}_p$	- resultante das forças de pressão por unidade de volume (F)
$F = V/(gD)^{1/2}$	- número de Froude
g	- aceleração da gravidade (LT^{-2})
h	- altura de água em poço de sucção (L)
H	- distância da tomada ao fundo do reservatório (L), energia em um ponto (L)
H^*	- carga sobre o eixo do orifício (L)
$\vec{i}$	- vetor unitário na direção x
$\vec{j}$	- vetor unitário na direção y
$\vec{k}$	- vetor unitário na direção z
L	- largura do canal de aproximação (L)
$N^*_T = \alpha/[1+(L/B) \tan \alpha]$	- parâmetro circulação
p	- pressão em um ponto ($ML^{-1}T^{-2}$)

Q	- vazão na tomada (L^3T^{-1})
r	- raio do núcleo de ar (L)
$Rey = VD/\nu$	- número de Reynolds
$Rey_r = Q/\nu S$	- número de Reynolds radial
S	- submergência da tomada (L)
Sc	-submergência crítica (L)
U_∞	- velocidade de aproximação do fluido (LT^{-1})
V	- velocidade na tomada (LT^{-1}), velocidade em um ponto (LT^{-1})
$\vec{V}$	- vetor velocidade
V_t, V_θ	- velocidade tangencial, medida a uma distância r do eixo do vórtice (LT^{-1})
$W = \rho V^2 D / \sigma$	- número de Weber
α	- ângulo de aproximação do fluxo (graus)
$\Gamma = V_\theta r$	- circulação (L^2T^{-1})
Γ_m	- circulação média (L^2T^{-1})
λ_L	- escala geométrica

λ_v	- escala de velocidades
ν	- viscosidade cinemática do fluido (L^2T^{-1})
π_Q	- coeficiente de vazão
ρ	- massa específica do fluido (ML^{-3})
σ	- viscosidade cinemática do fluido (MT^{-2})
ω	- velocidade angular (LT^{-1})

FERREIRA, Laura Maria Canno. **Submergência crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, como requisito para obtenção do título de Mestre. Campinas, 2001.

RESUMO

No projeto de tomadas d'água, os engenheiros hidráulicos deparam-se com uma grande dificuldade que é a prevenção de formação de vórtices. A presença de escoamento com vorticidade pode trazer conseqüências prejudiciais, tais como: queda do rendimento de máquinas hidráulicas, diminuição da vazão e vibrações. A submergência crítica é um dos parâmetros que mais influem para a ocorrência do fenômeno de formação de vórtices. Este parâmetro depende do diâmetro utilizado na tomada d'água, do ângulo de aproximação do escoamento, das dimensões de estruturas que possam estar próximas à tomada e do valor dos números de Froude, Reynolds e Weber. Este trabalho tem, como objetivo, o estudo relacionado à determinação de critérios que possibilitem impedir a formação de vórtices em tomadas d'água verticais. Um estudo experimental foi feito, empregando-se tomada d'água vertical com diâmetros diferentes, variando-se a altura da tomada, a submergência e a vazão. Pôde constatar-se a influência da profundidade de aproximação d'água em relação ao diâmetro da tomada. Para relações entre submergência e diâmetro da tomada maiores que 0,5 não ocorreu formação de vórtices intensos com arrastamento de ar. A partir desse limite, os vórtices são de baixa intensidade sem arrastamento de ar. Para não haver formação de vórtices de qualquer intensidade, a relação deveria ser maior que 3,0.

Palavras chaves: vórtice, submergência crítica, tomadas verticais, estudo experimental

1 INTRODUÇÃO

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.

No projeto de tomadas d'água, os engenheiros hidráulicos deparam-se com uma grande dificuldade que é a prevenção de formação de vórtices, pois a ocorrência de vórtices é ainda um assunto não esclarecido totalmente, dada a natureza complexa do fenômeno. Sabe-se, entretanto, que a presença de escoamento com vorticidade pode trazer conseqüências prejudiciais ao desempenho de máquinas hidráulicas.

Em instalações hidroelétricas, a geração de energia pode ser reduzida significativamente devido à presença de vórtices, através da superposição de três efeitos: perda de carga ao longo do conduto de adução, redução 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. No caso de vertedouros, a presença de vórtice com arraste diminui a capacidade de vazão, podendo resultar no transbordo da barragem.

No caso de bombas, além de causar redução no seu rendimento, a presença de vórtices contribui para o aumento na tendência à cavitação.

Assim, os fatores que influem na formação de vórtices devem ser estudados e conhecidos, com a finalidade de se poder tomar providências, orientadas à prevenção dos mesmos. Geralmente, a predição de vórtices fundamenta-se em critérios e/ou orientações de estudos teóricos ou experimentais. O estudo matemático é bastante complexo, sendo geralmente evitado, pois o número de variáveis envolvidas é muito

grande e a natureza do processo de formação de vórtices não é totalmente conhecida.

Deve-se salientar também que os estudos, principalmente em tomadas d'água são, via de regra, casos particulares, pois neles estão presentes fatores que variam para cada caso, tais como tipo de escoamento ou condições de aproximação à tomada e finalidade da obra.

Mesmo o estudo em modelo deve ser cuidadoso, devido à impossibilidade de redução das forças de viscosidade e tensão superficial; a influência dessas forças ocasiona o chamado efeito escala.

Muitos estudos foram realizados com tomadas d'água horizontais, determinando a submergência crítica. No entanto, não há resultados conclusivos para a submergência crítica no caso de tomadas d'água verticais, que são ainda mais suscetíveis à formação de vórtices.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é determinar, através de um estudo experimental, o valor da submergência crítica em tomadas d'água verticais. O estudo experimental será feito no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, empregando tubos de 0,075m, 0,100m e 0,125m para simular o escoamento através de tomadas verticais.

3 TRATAMENTO ANALÍTICO

Neste capítulo, são apresentadas as definições e formulações matemáticas que levam à introdução do estudo do fenômeno de formação de vórtices.

3.1 Estudo analítico

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

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

$$\Gamma = \oint \vec{V} \cdot d\vec{S} \quad (3.1)$$

Na qual:

Γ = circulação

$\vec{V}$ = vetor velocidade

$d\vec{S}$ = vetor elementar de comprimento

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

$$V = C/r \quad (3.2)$$

sendo r , o raio da trajetória.

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

É comum chamar de circulação do vórtice, o parâmetro

$$\Gamma = 2\pi r v \text{ ou } v r = \Gamma/2\pi \quad (3.3)$$

As forças atuantes em uma partícula fluida são as forças de pressão e as forças gravitacionais, já que neste caso, as forças tangenciais são desprezadas. Isolando um paralelepípedo elementar de fluido, de arestas dx , dy e dz , como mostra a Figura 3.1, a força gravitacional é dada por:

$$F = \rho \text{ Vol } g \quad (3.4)$$

Por unidade de volume tem-se:

$$\vec{f}_p = -\rho g \vec{k} \quad (3.5)$$

sendo:

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

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

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

$$\sum F_{p_x} = p dy dz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right) dy dz \quad (3.6)$$

$$\sum F_{p_x} = -\frac{\partial p}{\partial x} dx dy dz \quad (3.7)$$

sendo $dx dy dz = dVol$, a resultante das forças de pressão na direção x por unidade de volume fica:

$$f_{px} = -\frac{\partial p}{\partial x} \quad (3.8)$$

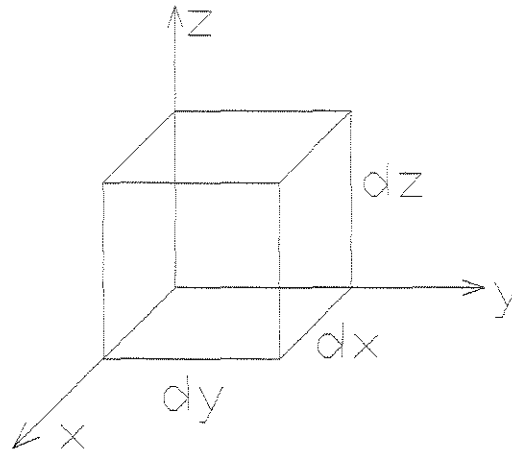


Figura 3.1 Paralelepípedo elementar de fluido, segundo PIMENTA (1981).

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

$$f_{py} = -\frac{\partial p}{\partial y} \quad (3.9)$$

$$f_{pz} = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (3.10)$$

Portanto, a resultante das forças de pressão é:

$$\vec{f}_p = f_{px} \vec{i} + f_{py} \vec{j} + f_{pz} \vec{k} \quad (3.11)$$

$$\vec{f}_p = -\frac{\partial p}{\partial x} \vec{i} - \frac{\partial p}{\partial y} \vec{j} - \frac{\partial p}{\partial z} \vec{k} \quad (3.12)$$

$$\vec{f}_p = -\nabla p \quad (3.13)$$

Considerando a equação 3.13 , a resultante das forças atuantes no paralelepípedo elementar é:

$$-\nabla p - \rho g \vec{k} = \rho \vec{a} \quad (3.14)$$

sendo a , a aceleração do fluido.

No caso de um movimento de rotação em torno do eixo vertical, as forças componentes gravitacionais e de pressão são:

$$-\frac{\partial p}{\partial r} - \rho \omega^2 r = 0 \quad (3.15)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - \rho g = 0 \quad (3.16)$$

Disto decorre:

$$dp = \frac{\partial p}{\partial r} dr + \frac{\partial p}{\partial z} dz = \rho \omega^2 r dr - \rho g dz \quad (3.17)$$

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

Este tipo de vórtice é chamado de vórtice forçado, resultando então em

$$V = \omega r \quad (3.18)$$

sendo ω uma velocidade angular constante.

Essa combinação de vórtice livre com forçado denomina-se vórtice de Rankine, mostrado na Figura 3.2, que representa razoavelmente o movimento da maioria dos vórtices naturais. O diagrama de distribuição de velocidades, neste caso, é uma combinação de ambos os diagramas e está representado na Figura 3.3.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, será apresentada uma revisão bibliográfica com os principais trabalhos existentes sobre a formação de vórtices em tomadas d'água.

4.1 Tipos de entrada nas tomadas d'água

As tomadas d'água podem ser divididas em verticais e horizontais. Em ambos os casos, a presença de vórtices é um fator prejudicial, embora seja mais freqüente em tomadas verticais do que nas horizontais. São consideradas também as instalações de bombeamento que são, na maioria das vezes, tomadas verticais. As configurações das tomadas verticais e horizontais estão apresentadas na Figura 4.1.

As tomadas verticais podem ter a entrada radial, vórtice ou tangencial. Na Figura 4.2 mostra-se alguns esquemas de estruturas de entrada em tomadas d'água.

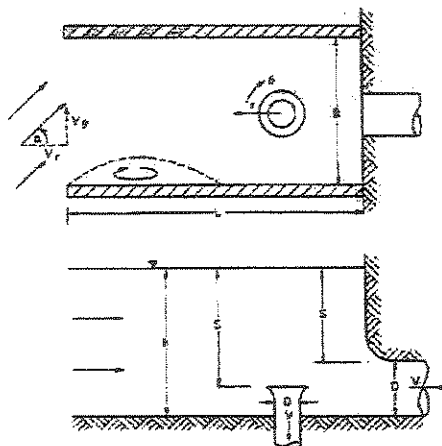


Figura 4.1 Configurações de tomadas horizontais e verticais, segundo GULLIVER, RINDELS e LINDBLOM (1986)

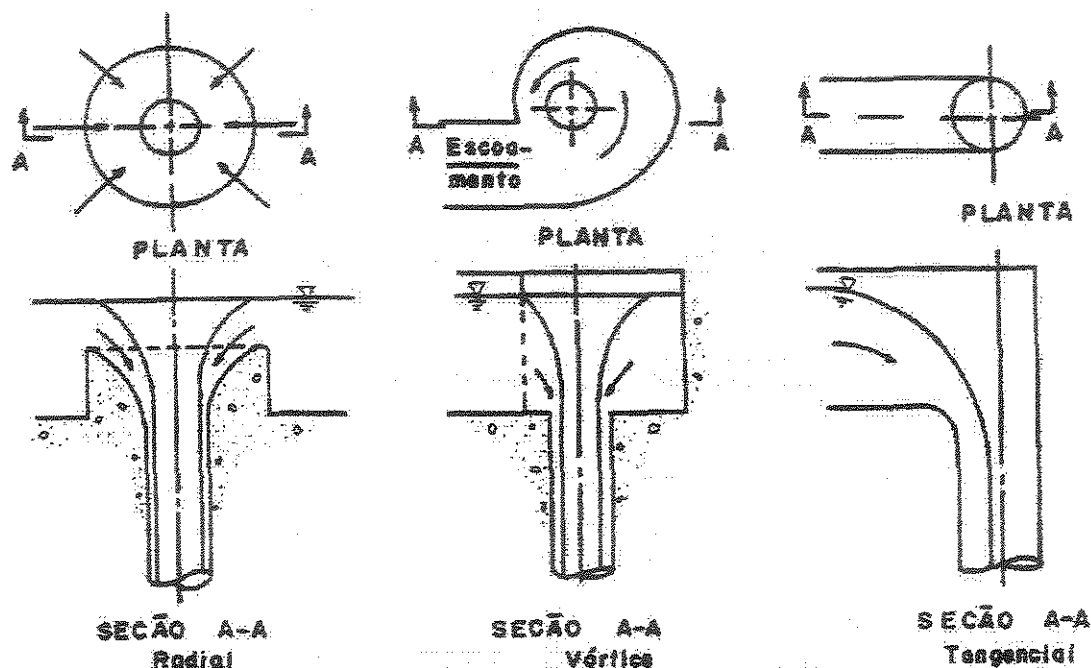


Figura 4.2 Tipos de entrada para poços verticais, segundo FALVEY (1980)

Nas Figuras 4.3 e 4.4, são apresentados os exemplos das tomadas d' água das Usinas Hidrelétricas de Ilha Solteira, no Rio Paraná e de Xingo, no Rio São Francisco respectivamente. Nestes casos, as estruturas estão integradas com a barragem e servem como parte do sistema de captação para a casa de força. No caso de Xingo a estrutura de entrada é ligada aos respectivos condutos forçados de 9,5 m de diâmetro. Em outros casos, a tomada de água consiste numa estrutura isolada chamada de torre de tomada de água, que é rodeada por água e com aberturas na periferia. Este é o caso da tomada da Usina Hidrelétrica de Xavantes, no rio Paranapanema, que pode ser vista na Figura 4.5. A estrutura de entrada consiste em duas torres prismáticas de concreto, conectadas cada uma a um poço vertical de 9,5 m de diâmetro. Um outro exemplo é o da chamada tomada "off – stream", mostrado na Figura 4.6. Neste caso, a tomada conduz o fluxo para os condutos de desvio ou para o penstock de uma casa de força isolada, fora do corpo da barragem.

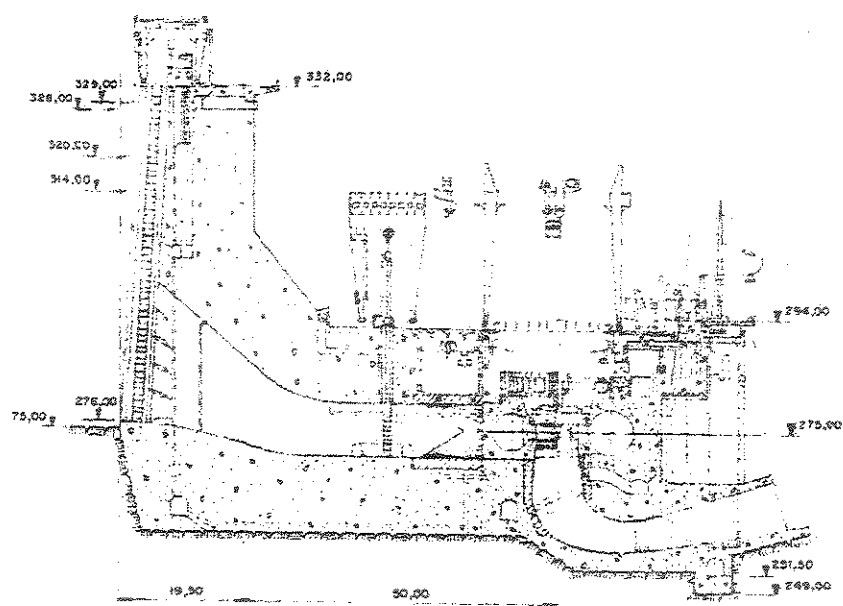


Figura 4.3 Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, Rio Paraná. (CBGB, 1982)

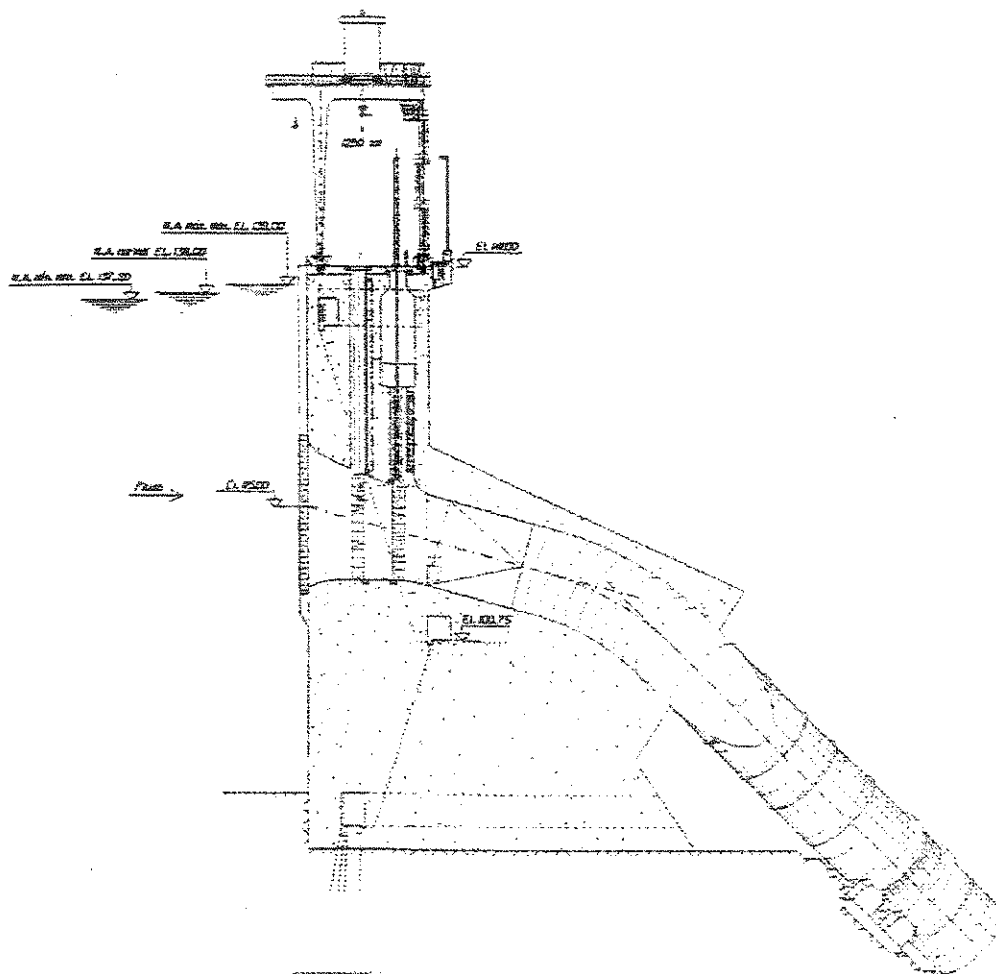


Figura 4.4 Usina Hidrelétrica de Xingó, Rio São Francisco.

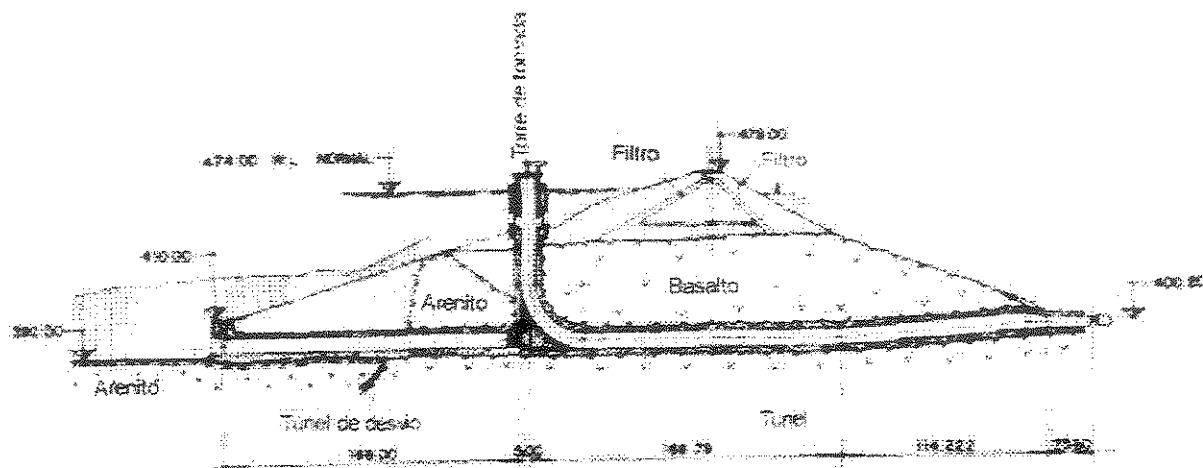


Figura 4.5 Usina Hidrelétrica de Xavantes, Rio Paranapanema (CBGB, 1982).

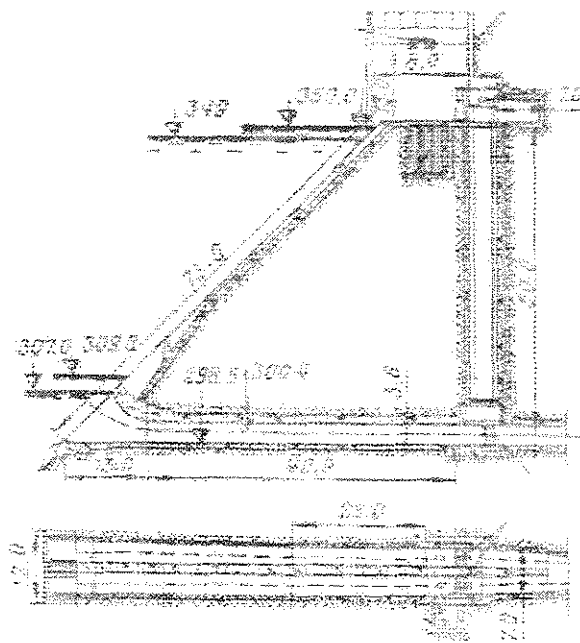


Figura 4.6 Tomada d'água do tipo "off-stream", (ILYINYKH, 1985).

4.2 Revisão bibliográfica

Várias investigações vêm sendo realizadas para tornarem claras as condições de semelhança na construção de um modelo para o estudo da ocorrência de vórtice. Até hoje encontra-se dificuldade para se estabelecer os efeitos da viscosidade, tensão

superficial e as velocidades que devem ser usadas no modelo.

Segundo MARKLAND e POPE (1955), a submergência crítica, definida como a altura mínima necessária para evitar o arraste de ar, é bastante sensível a pequenas mudanças nas condições da entrada dos poços de sucção, por isso, são mais úteis comparações qualitativas para vários arranjos do que interpretações quantitativas. Para determinar a submergência crítica, realizaram vários estudos em poços de sucção de seção circular e retangular. Nos poços de seção circular, foram realizados ensaios com fluxo radial e rotacional, verificando que, em ambos os casos, o aparecimento de vórtices dependia da distância do tubo ao fundo do poço; quanto menor a distância, mais severos tornavam-se os vórtices formados. Em poços retangulares, foram feitos ensaios para avaliar a influência da distância da tomada em relação ao fundo do poço e às paredes do poço de sucção. Verificaram que o aumento da distância da tomada ao fundo do poço diminui a submergência crítica necessária, mas a altura total de água para evitar o arraste é independente da altura da tomada em relação ao fundo. No caso das paredes do poço, quanto menor a distância entre a tomada e a parede, mais fracos são os vórtices formados, até que não se formam mais se a tomada estiver encostada.

Os autores consideram, ainda, que o critério de velocidades iguais no modelo e no protótipo para as mesmas condições deve ser tratado com precaução na interpretação dos resultados obtidos no modelo; se o vórtice obtido no protótipo for mais acentuado que no modelo, certamente a submergência no protótipo será maior que a obtida pela escala do modelo.

Para DENNY (1956), apesar dos mecanismos de formação de vórtice serem complexos, os experimentos mostram um comportamento regular e repetitivo. Os estudos foram realizados em modelos físicos, através de uma série de ensaios com tomadas d'água verticais ligadas à bomba centrífuga e inseridas no interior de poços de sucção com várias geometrias e condições de aproximação; os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.7. O autor estabeleceu, ainda, a dependência de outros dois parâmetros para a ocorrência de vórtice, que são a velocidade e a submergência da tomada. Na Figura 4.8, estão os resultados obtidos de um experimento com um conduto de 0,200m de diâmetro, em um poço de 2,44m de largura, e uma relação $c/D = 0,9$, sendo c a distância entre a tubulação de sucção e o fundo do poço.

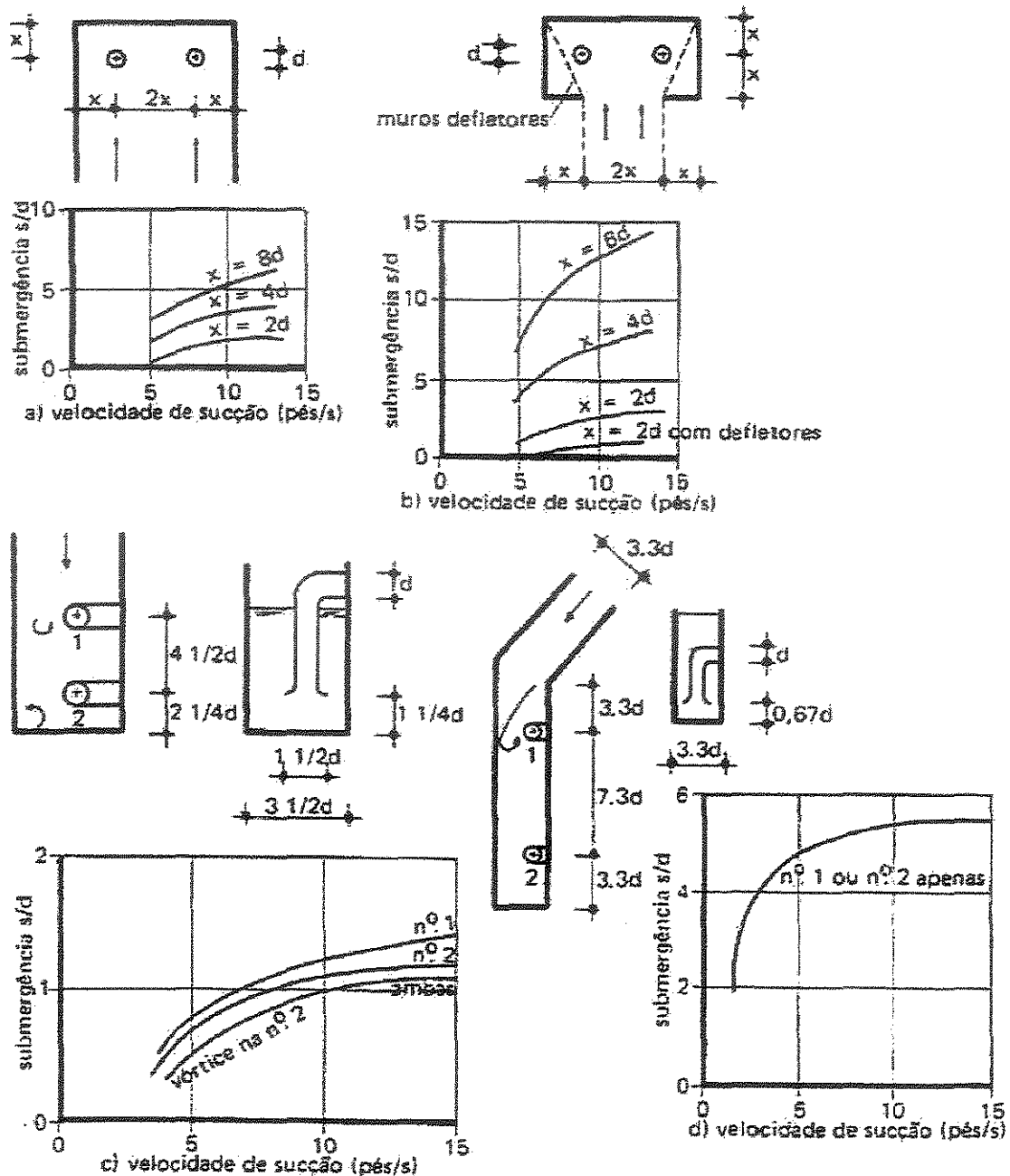


Figura 4.7 Características dos poços de sucção ensaiados por DENNY (1956).

Alterando a largura por onde a água entrava no poço, percebeu que, quando a largura se reduzia à metade da largura total do poço, era necessária uma relação $S/D \geq 15$ para evitar o arraste de ar, sendo que com a largura total do poço uma relação $S/D = 3,5$ era suficiente para evitar o arraste de ar. Observou também que quanto mais

distante do fundo estiver a tomada, menor a submergência, apesar da altura de água aumentar consideravelmente (Figura 4.9).

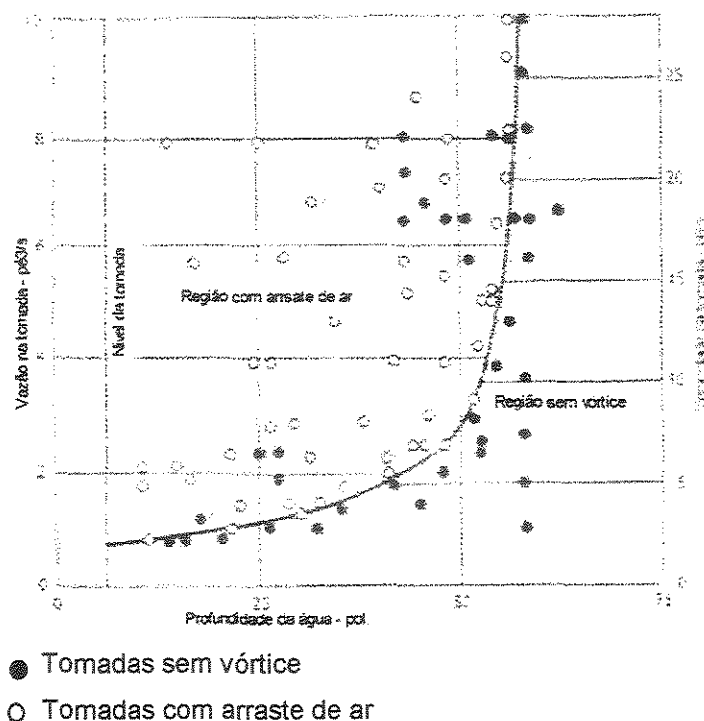


Figura 4.8 Curva submergência x velocidade segundo DENNY (1956).

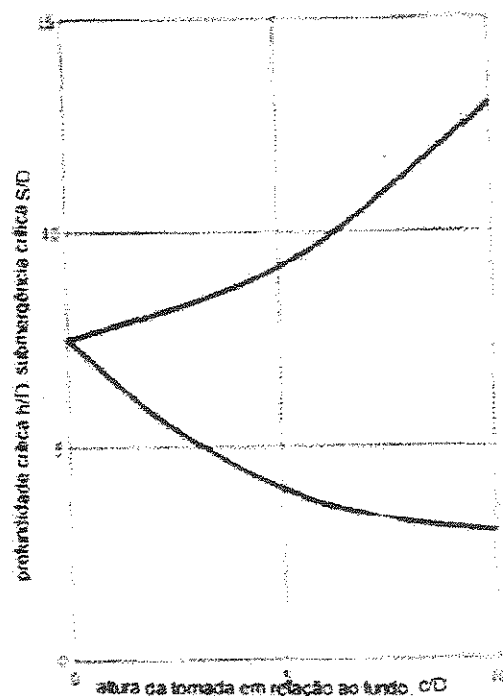


Figura 4.9 Relação entre a altura da tomada em relação ao fundo e a submergência, segundo DENNY (1956).

Verificou, ainda, que os vórtices mais fortes apareciam quando a tomada estava localizada no centro do poço, sendo os poços de menor dimensão melhores que os de maior dimensão; com a tomada próxima às paredes do poço, a submergência era aproximadamente proporcional à distância, se esta fosse no máximo até 10 diâmetros. Notou também que a severidade dos vórtices dependia da velocidade de sucção; o arraste de ar raramente ocorria com velocidades menores que 0,61 m/s, e acima de 4,57 m/s ou 6,10 m/s, a severidade dos vórtices não aumentava substancialmente.

ANWAR (1965) fez um estudo teórico e experimental para determinar as condições do fluxo na entrada de uma tomada quando se formava um vórtice com núcleo de ar. O experimento foi realizado em um tanque cilíndrico com uma abertura no fundo para que os diâmetros das tomadas pudessem ser variados.

Medindo a velocidade tangencial para várias alturas de água pôde verificar que a velocidade tangencial depende somente do raio do núcleo de ar, medido a partir do eixo de simetria. Comparando os resultados experimentais com os teóricos ($V_{tr} = C^*$) da distribuição da velocidade tangencial para uma determinada altura de água e vazão, observou uma separação entre um determinado ponto e o raio do núcleo de ar.

ANWAR (1966), que investigou através de estudo teórico e experimental, a formação de vórtices fracos ou com um estreito núcleo de ar, afirma que a circulação (conseqüentemente a velocidade tangencial) é constante para raios maiores que o raio da tomada e a velocidade axial próxima ao eixo de rotação é praticamente zero, alcançando valor máximo entre 0,75 e 0,77 do valor do raio da tomada. Concluiu também que a formação de vórtices fracos não depende do número de Reynolds radial (Re_{yr}), desde que este seja maior que 10^3 .

Para avaliar o efeito de escala na formação de vórtices com arraste de ar, McCORQUODALE (1968) montou três modelos físicos, com orifícios de 0,050m, 0,100m e 0,150m, observando a existência de um efeito de escala geral e um local. O efeito de escala geral indica diferenças relativas ao comportamento do modelo e o local, que se refere a diferenças em certas regiões do modelo (por exemplo, a região do núcleo de ar). Através dos experimentos realizados concluiu que, em modelos com diâmetro menor do que 0,050m, o efeito de escala é significativo, sendo que para modelos com diâmetro mínimo entre 0,050m e 0,100m pode-se obter uma boa

semelhança.

Segundo GORDON (1970), os fatores que afetam a formação de vórtice são a geometria da aproximação, a velocidade, o diâmetro da tomada e a submergência. As tomadas com aproximação lateral são mais dispostas à formação de vórtices do que as simétricas. Contudo, é difícil medir este efeito, pois cada geometria é única para cada tomada. Por isso, concentrou-se em investigar a influência da velocidade e da submergência na formação de vórtice.

Analisando dados de tomadas d'água de 29 usinas hidrelétricas, com a configuração mostrada na Figura 4.10, chegou à seguinte equação empírica da submergência

$$S = C' V D^{1/2} \quad (4.1)$$

na qual:

S = submergência na tomada

C' = coeficiente que depende da geometria da tomada

V = velocidade na tomada

D = diâmetro da tomada

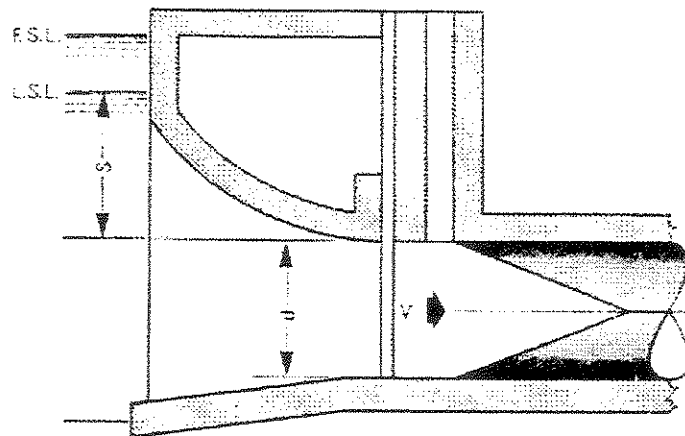


Figura 4.10 Configuração geral das tomadas estudadas por Gordon (1970).

Em tomadas com aproximação simétrica $C' = 0,3$ e para aproximação lateral $C' = 0,4$, resultando no gráfico mostrado na Figura 4.11.

Com os resultados obtidos em suas observações, plotou os pontos no gráfico obtido por Denny-Young. Observando a Figura 4.12, nota-se que todos os pontos, com exceção de um, caíram na região onde os vórtices seriam previstos em

modelos. Isso ressalta a existência do já mencionado efeito de escala. Uma outra explicação pode estar no fato da não definição de “tomadas com vórtice”, pois o autor não considera pequenas depressões ou mesmo pequenos vórtices, pelo fato de não se transformarem em vórtices com arraste de ar.

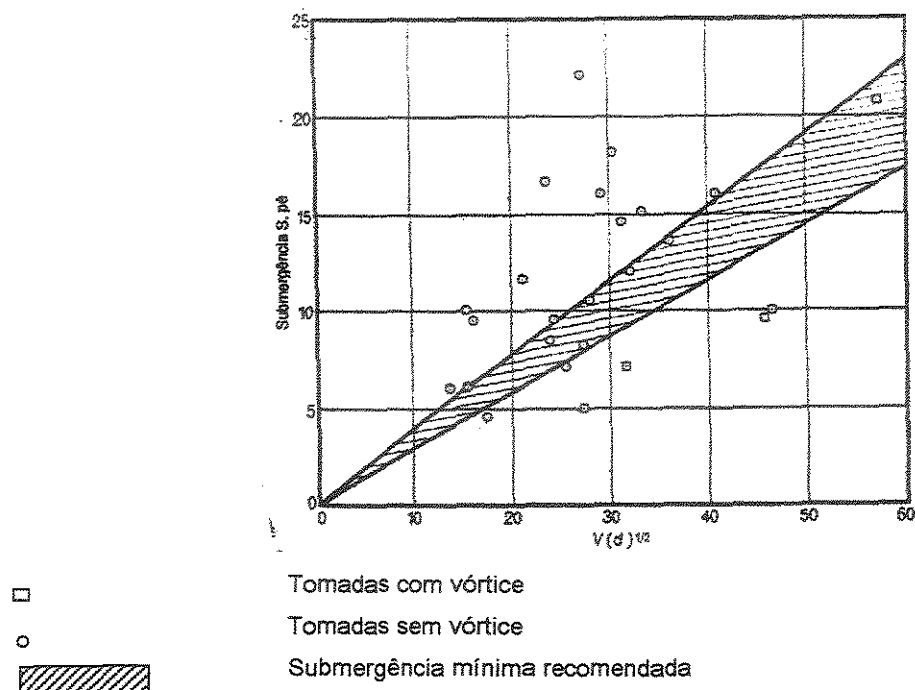


Figura 4.11 Limites de submersão mínima para tomadas com aproximação simétrica e lateral, segundo GORDON (1970).

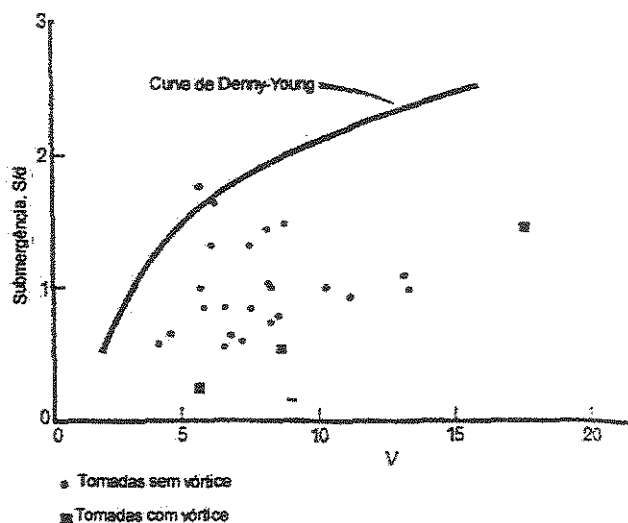


Figura 4.12 Gráficos dos pontos obtidos por GORDON (1970) plotados na curva de Denny-Young.

REDDY e PICKFORD (1972) realizaram ensaios em um poço de sucção de seção retangular e afirmaram que a relação S/D , necessária para evitar a formação de vórtices com arraste de ar, é função do número de Froude (F), podendo assumir que:

$$\frac{S}{D} = \frac{v}{\sqrt{gD}} \quad \text{ou} \quad S = \frac{vD^{\frac{1}{2}}}{\sqrt{g}}, \quad (4.2)$$

na qual:

S = submergência na tomada

D = diâmetro da tomada

V = velocidade na tomada

g = aceleração de gravidade

A equação 4.2 é semelhante à equação proposta por GORDON (1970), pois, utilizando o SI, a constante é igual a 0,319.

DAGGETT e KEULEGAN (1974) fizeram um estudo para verificar a influência dos números de Reynolds (Re) e Weber (We) na formação de vórtices. Para isso, provocaram a formação de vórtices em dois tanques cilíndricos com dimensões diferentes, usando várias misturas água-glicerina e óleos de várias graduações para obter diferentes valores de viscosidade e tensão superficial. Os tanques possuíam um orifício no centro, representando a tomada, sendo que o diâmetro deste orifício foi variado. Além disso, os tanques possuíam pás que permitiam variar o ângulo de entrada do fluxo, podendo assim estabelecer diferentes valores para a circulação.

Para verificar a influência do número de Reynolds e da circulação, foi feito um gráfico do coeficiente de vazão π_Q em função de Re , para diferentes valores do número de circulação, mostrado na Figura 4.13. Através do gráfico, verifica-se que para $Re > 5 \times 10^4$ π_Q é somente função da circulação. Também pode-se observar que, à medida que Re diminui, ou seja, aumentam os efeitos viscosos, o coeficiente de vazão torna-se uma função de Re somente.

Ensaando líquidos de igual viscosidade e diferentes tensões superficiais, concluíram que a tensão superficial não afetava a formação de vórtices.

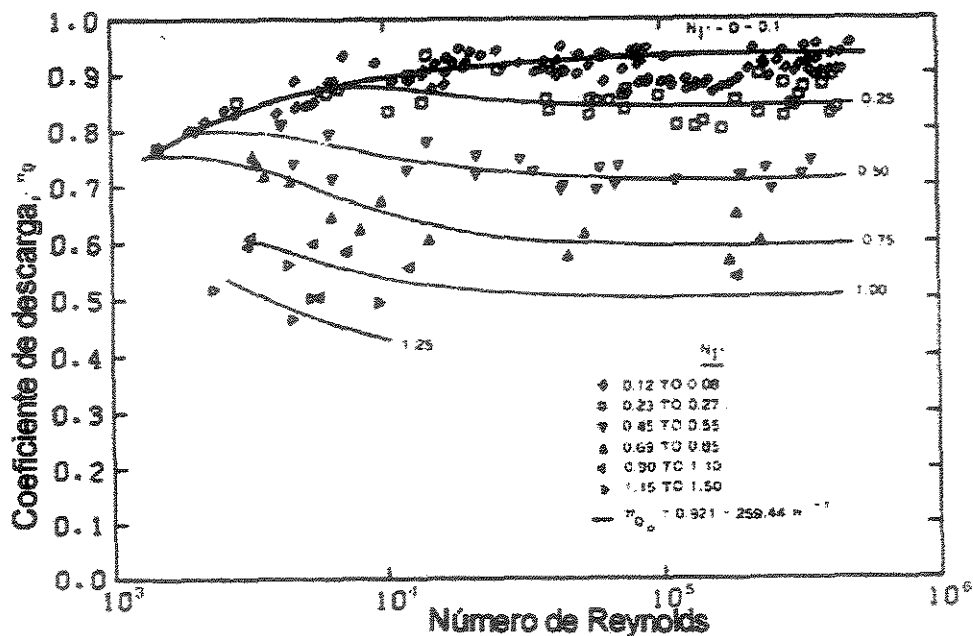


Figura 4.13 Gráfico do coeficiente de descarga em função do número de Reynolds, segundo DAGGETT e KEULEGAN (1974).

Além disto, foram verificadas as condições para as quais o núcleo de ar se formava e concluíram que para Reynolds mais baixos, cresce a região onde o núcleo de ar não se forma. Portanto, para as mesma profundidades de escoamento e condições iniciais de circulação, num modelo com Rey baixo, pode não haver formação de núcleo de ar, enquanto que no protótipo, sim. Por isso, cuidados devem ser tomados para operação de modelos em que a relação do Rey para o modelo esteja na região onde os efeitos viscosos são desprezíveis.

ŽAJDLÍK (1977), preocupado com critérios de modelação, realizou ensaios em cinco modelos de poços de sucção retangulares de diferentes tamanhos e com vários diâmetros de sucção para determinar a dependência entre a escala geométrica, escala de velocidades e a profundidade da água no poço.

Com os experimentos, foi determinado que a velocidade é função da relação entre a altura de água no poço, h e o diâmetro do tubo de sucção, D . Foi feito um gráfico de λ_v em função de λ_L , para vários valores de h/D quando se inicia a formação de vórtice com arraste de ar, que está apresentado na Figura 4.14. Do gráfico observa-se que λ_v aumenta com o aumento de λ_L , e também com a diminuição da altura de

água; percebe-se também que quando $h/D \geq 4$ e $\lambda_L = 2,7$, λ_V torna-se constante ($\lambda_V \approx 1,15$). Na Figura 4.15 o mesmo gráfico, para o caso de vórtices sem arraste de ar; nota-se que λ_V fica constante ($\lambda_V \approx 1,28$) para $h/D = 3$ e $\lambda_L = 2,2$.

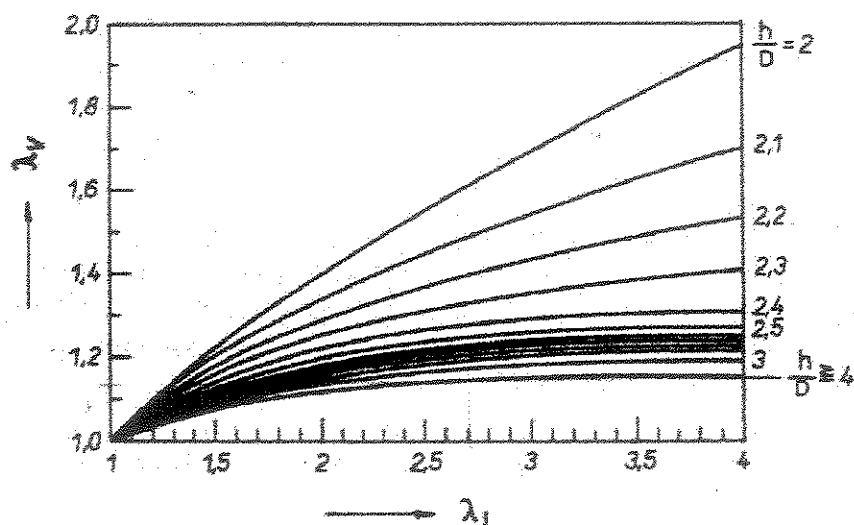


Figura 4.14 Escala de velocidades em função da escala de comprimento para a formação de vórtice com arraste de ar, segundo ŽAJDLÍK (1977).

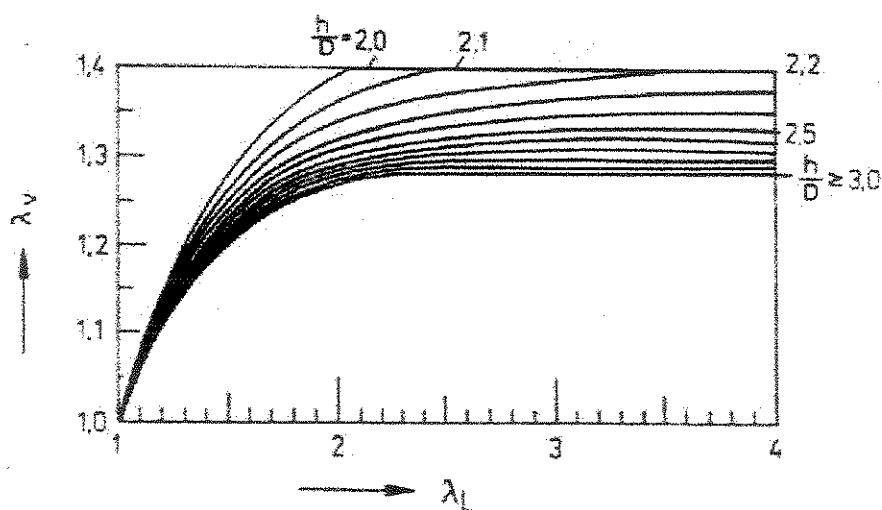


Figura 4.15 Escala de velocidades em função da escala de comprimento para o início da formação de vórtice sem arraste de ar, segundo ŽAJDLÍK (1977).

Para estudar as condições de semelhança em tomadas horizontais, ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978) estabeleceram, através da análise dimensional

parâmetros adimensionais que regem o fenômeno de aparecimento de vórtices, chegando a:

$$C = f(\Gamma D/Q, S/D, b/D, \text{Rey}_r, W) \quad (4.3)$$

na qual:

$$C = \frac{Q}{A\sqrt{2gS}} \quad (4.4)$$

$$\Gamma = V_\theta r \quad (4.5)$$

C = coeficiente de vazão

Γ = circulação

V_θ = velocidade tangencial, medida a uma distância r do eixo do vórtice

Q = vazão na tomada

$\text{Rey}_r = Q/\nu S$ = número de Reynolds radial

$W = \rho Q^2 S / A^2 \sigma$ = número de Weber

A = área da seção transversal da tomada

ρ = massa específica do fluido

σ = tensão superficial do fluido

ν = coeficiente de viscosidade cinemática do fluido

g = aceleração da gravidade

H = distância da tomada até o fundo do canal

S = submersão

Para determinar os parâmetros da Equação 4.3, os autores construíram um canal em modelo físico, cuja configuração está apresentada na Figura 4.16.

Os ensaios foram realizados para intervalos de vazão entre 0,0025 e 0,009 m³/s e observaram que um pequeno aumento na vazão ou diminuição na submersão tornavam o núcleo de ar progressivamente maior.

Através de um gráfico do adimensional $\Gamma_m D/Q$ contra o número de Reynolds radial (para vários valores de S/D e $2 \leq H/D \leq 6$), como mostra a Figura 4.17, conclui-se que para $\text{Rey}_r > 3 \times 10^4$ a circulação torna-se independente do número de Reynolds radial. Portanto, para minimizar o efeito de escala deve-se operar um modelo onde $\text{Rey}_r > 3 \times 10^4$.

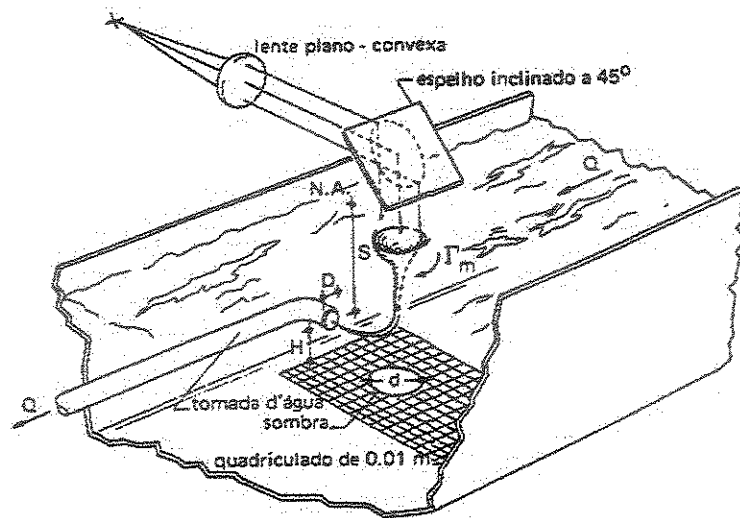


Figura 4.16 Esquema do modelo da tomada ensaiada por ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978)

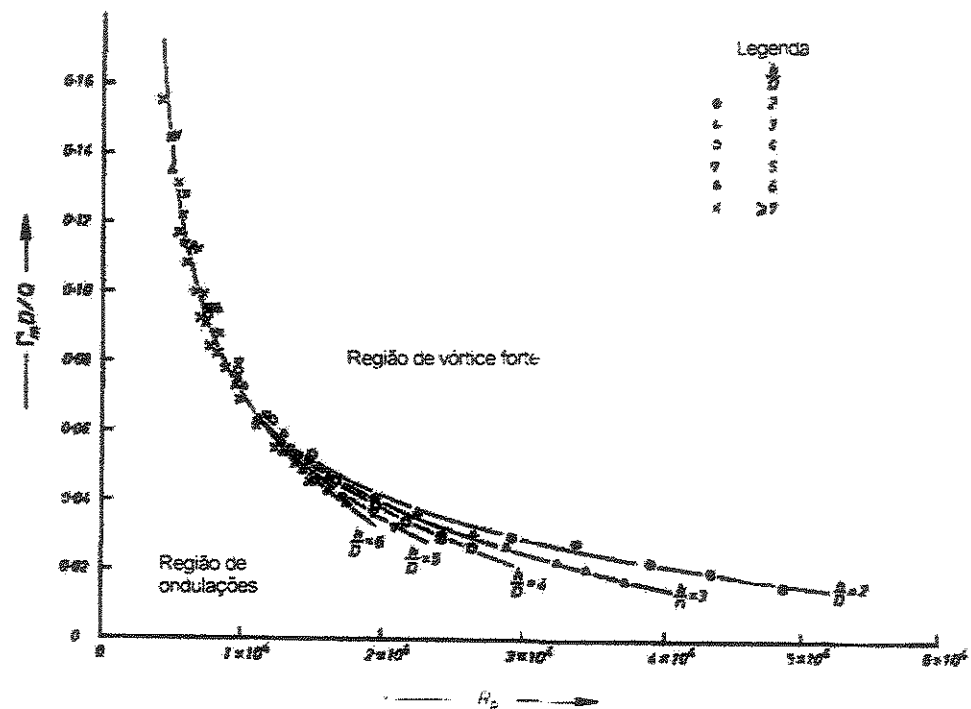


Figura 4.17 Dependência do parâmetro circulação em função do número de Reynolds radial, segundo ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978).

O parâmetro circulação também foi colocado num gráfico em função do número de Weber, apresentado na Figura 4.18, de onde se pôde concluir que à medida que

este aumenta, aquele torna-se constante, para determinado valor de h/D ; além disso, percebe-se que quanto maior Re_{yr} , a circulação torna-se menos dependente do número de Weber.

Portanto, chegou-se à conclusão que para números de Weber e de Reynolds radial elevados, o escoamento não é afetado pela tensão superficial.

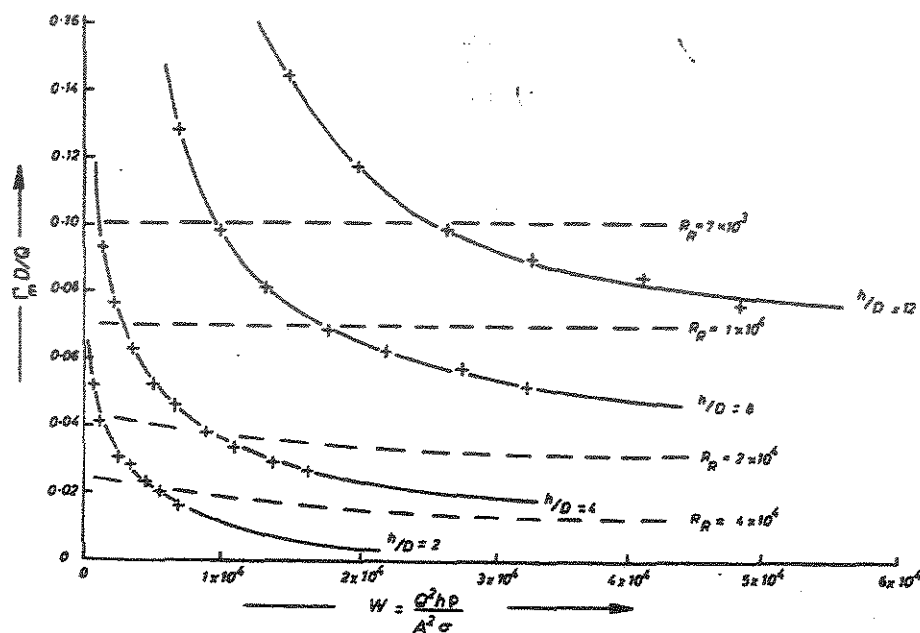


Figura 4.18 Influência da tensão superficial sobre o parâmetro circulação, segundo ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978).

Ainda com o mesmo experimento, um gráfico da circulação contra o coeficiente de vazão (Figura 4.19) mostra que para valores constantes de C , o adimensional h/D torna-se menos dependente do número de Reynolds radial quando $Re_{yr} > 3 \times 10^4$.

Com estes resultados, pôde-se concluir que nos estudos em modelo, o aparecimento de vórtices depende somente dos valores de $\Gamma_m D/Q$, h/D e C se $Re_{yr} > 3 \times 10^4$ e We elevado o suficiente para se desprezar os efeitos da tensão superficial.

O gráfico da figura 4.19 pode ser usado para prever o aparecimento de vórtices quando os três adimensionais são conhecidos e $Re_{yr} > 3 \times 10^4$. A curva de h/D indica o limite entre a região de vórtices fracos e intensos; acima dela, está a região de vórtices com arraste e abaixo, a de vórtices fracos.

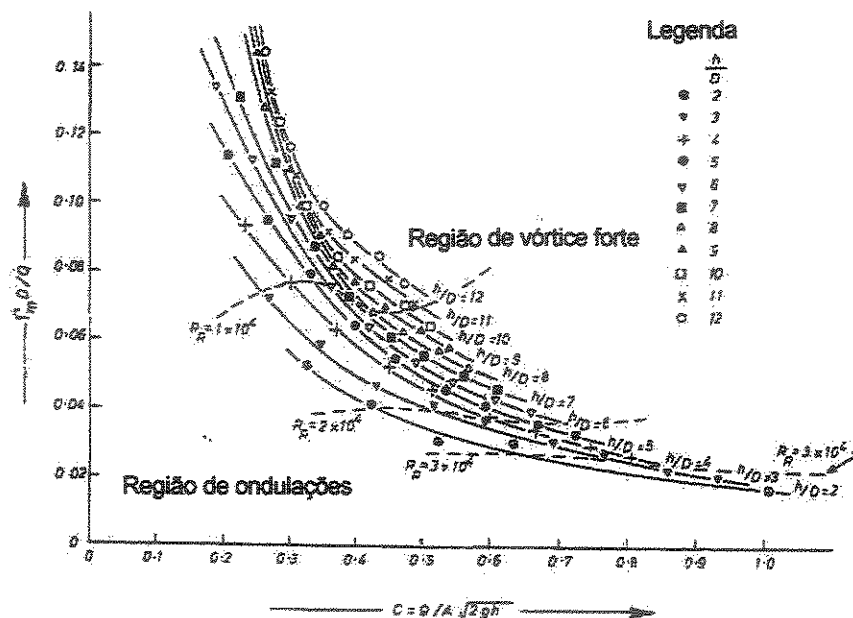


Figura 4.19 Variação do coeficiente de vazão, em função do parâmetro de circulação, segundo ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978).

Para JAIN e RAJU (1978), as condições de semelhança têm sido pouco investigadas, e ainda não se sabe muito a respeito da influência das forças gravitacionais, da viscosidade e tensão superficial. Para estudar estes efeitos e estabelecer um critério que pudesse predeterminar a submersão crítica desenvolveram um estudo em modelo, em dois tanques circulares (com tomada vertical), para que o diâmetro da tubulação da tomada, a submersão, a vazão da tomada, o ângulo das pás para gerar uma circulação, a viscosidade do líquido e a tensão superficial do líquido fossem variados. Para aumentar sua viscosidade, foi usado Cepol como um aditivo na água, e para alterar a tensão superficial foi usada uma mistura de água e álcool iso-amil, que tem a mesma tensão superficial da água. Foi concluído que para $W \geq 120$ desprezam-se os efeitos da tensão superficial na submersão crítica.

Os autores também defendem que há um limite para o número de Reynolds acima do qual pode-se desprezar os efeitos viscosos, mas este limite é diferente para cada valor do número de Froude: quanto mais alto o número de Froude, maior é o limite para o número de Reynolds.

Além disso, propuseram que o modelo pode ser operado com a igualdade de

Froude, desde que se faça uma correção para considerar a distorção causada pela diminuição no número de Reynolds. O gráfico da Figura 4.20 mostra o fator de correção e pode ser usado para a previsão da submergência crítica do protótipo.

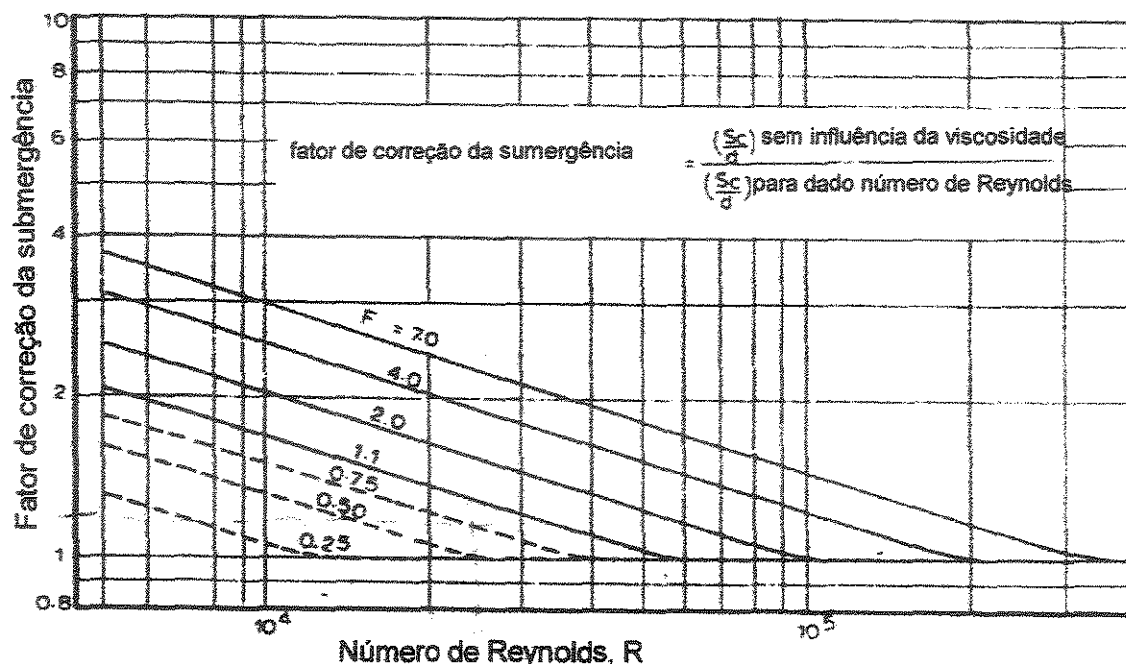


Figura 4.20 Variação do fator de correção da submergência com número de Reynolds e número de Froude, segundo JAIN e RAJU (1978).

Segundo HECKER (1981), é difícil demonstrar que as características do núcleo de ar do vórtice não são afetadas com uma mudança significativa do número de Weber. Para investigar essa influência, realizou um estudo mudando o número de Reynolds e mantendo constante outros parâmetros. Porém, esta variação no número de Weber requer alterações na velocidade e no diâmetro da tomada, e isto altera também o número de Reynolds. O isolamento dos efeitos devido ao número de Weber precisaria de um gráfico de W contra parâmetros relacionados ao vórtice para valores constantes de circulação, geometria e número de Reynolds; isto seria praticamente impossível devido à relação entre os números de Reynolds e de Weber. Além disso, o uso da velocidade e do diâmetro da tomada não são parâmetros tão importantes para avaliar a influência do número de Weber nas características do núcleo de ar como, por exemplo, a máxima velocidade tangencial e o raio do núcleo de ar.

Para testar a capacidade dos modelos hidráulicos de preverem o aparecimento de vórtice, comparou dados de 22 modelos com o observado nos protótipos e dividiu as ocorrências em três categorias:

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

Dos projetos citados na categoria *b*, dois deles tiveram suas velocidades aumentadas de 2 a 4 vezes em relação às dadas pela escala Froude.

Para ele, então, os modelos operados com semelhança de Froude são adequados, apesar de terem algum efeito de escala quando simulam vórtices com núcleo; para compensar estes efeitos é necessário aumento das velocidades determinadas pela escala, porém, grandes aumentos tendem a dissipar ao invés de intensificar a vorticidade, devido ao aumento da turbulência e da ação de ondas no modelo. O uso de velocidades iguais no modelo e protótipo só é relevante para modelos grandes, onde um pequeno aumento na velocidade leva à velocidade do protótipo.

Segundo SHARP (1981), as velocidades dos modelos baseadas na escala de Froude são pequenas para dar condições de comparação entre modelo e protótipo; o uso da escala de Froude garante a similaridade dos efeitos gravitacionais, porém, para compensar os erros viscosos devido à escala, o modelo deve ser operado inicialmente com as velocidades de Froude para estabelecer as características do fluxo; se houver alguma evidência da formação de vórtice, as velocidades são aumentadas. Porém, este procedimento pode distorcer o fluxo, sendo necessários alguns cuidados básicos.

AOKI (1982), a partir de uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos existentes sobre a formação de vórtices em tomadas de água, fez algumas considerações sobre critérios de semelhança e técnicas de modelação propostos por alguns pesquisadores. Segundo este autor, as curvas obtidas por Denny (1956) podem ser usadas para verificar a formação de vórtices em tomadas d'água verticais, porém, quando as dimensões do projeto forem muito diferentes das dimensões utilizadas pelo pesquisador em seus "lay-outs" ou a geometria de aproximação for completamente diferente daquela apresentada pelo modelo, os resultados obtidos não poderão ser

utilizados, sendo necessário um estudo mais detalhado através da construção de um modelo físico.

Analisando as retas propostas por Gordon (1970), mostradas na Figura 4.11, conclui que podem ser úteis apenas para uma avaliação prévia da formação de vórtices em protótipos, pois foram traçadas a partir de observações em tomadas de características próprias, além da consideração da influência da aproximação ser muito genérica.

Com relação ao trabalho de Anwar, Weller e Amphlet (1978), afirma que é praticamente impossível o uso da Figura 4.19 para prever o aparecimento de vórtices devido à dificuldade de se avaliar I_m ; além disso, o coeficiente de vazão C , é calculado para o modelo na presença de vórtice, e, avaliar este parâmetro em um protótipo quando se tem apenas o projeto do mesmo, é difícil.

CUOMO (1981) apresentou formulações matemáticas que levam a uma introdução do fenômeno de formação de vórtices em tomadas d'água; uma está baseada na hipótese de vórtice livre e outra baseia-se na combinação de um vórtice livre com um vórtice forçado, constituindo o chamado vórtice combinado de Rankine.

MARTIM (1983) 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-se na Figura 4.21, podem ser utilizadas grades horizontais e verticais ou alguns dispositivos para eliminar as zonas mortas do escoamento, as quais podem propiciar o aparecimento de vórtices.

O problema da semelhança foi também abordado pelo autor, que aponta que os modelos de Froude são contra a segurança por fazer com que os efeitos devido às forças viscosas e de tensão superficial tornem-se menos importantes no modelo do que no protótipo. Para evitar isso, pode-se aumentar as velocidades dos modelos operados com semelhança de Froude até que se igualem às velocidades do protótipo, porém, isto pode conduzir a fenômenos como ondulações, ressaltos, etc.

Em um estudo hidráulico feito no LNEC, foi apresentado o seguinte critério:

$$Q/H^* > 0,03 \quad (4.6)$$

$$Q/D^{2/3} > 0,11$$

(4.7)

na qual

Q = vazão

H^* = carga sobre o eixo do orifício

D = diâmetro do orifício

Porém, tal critério não é defendido com caráter absoluto.

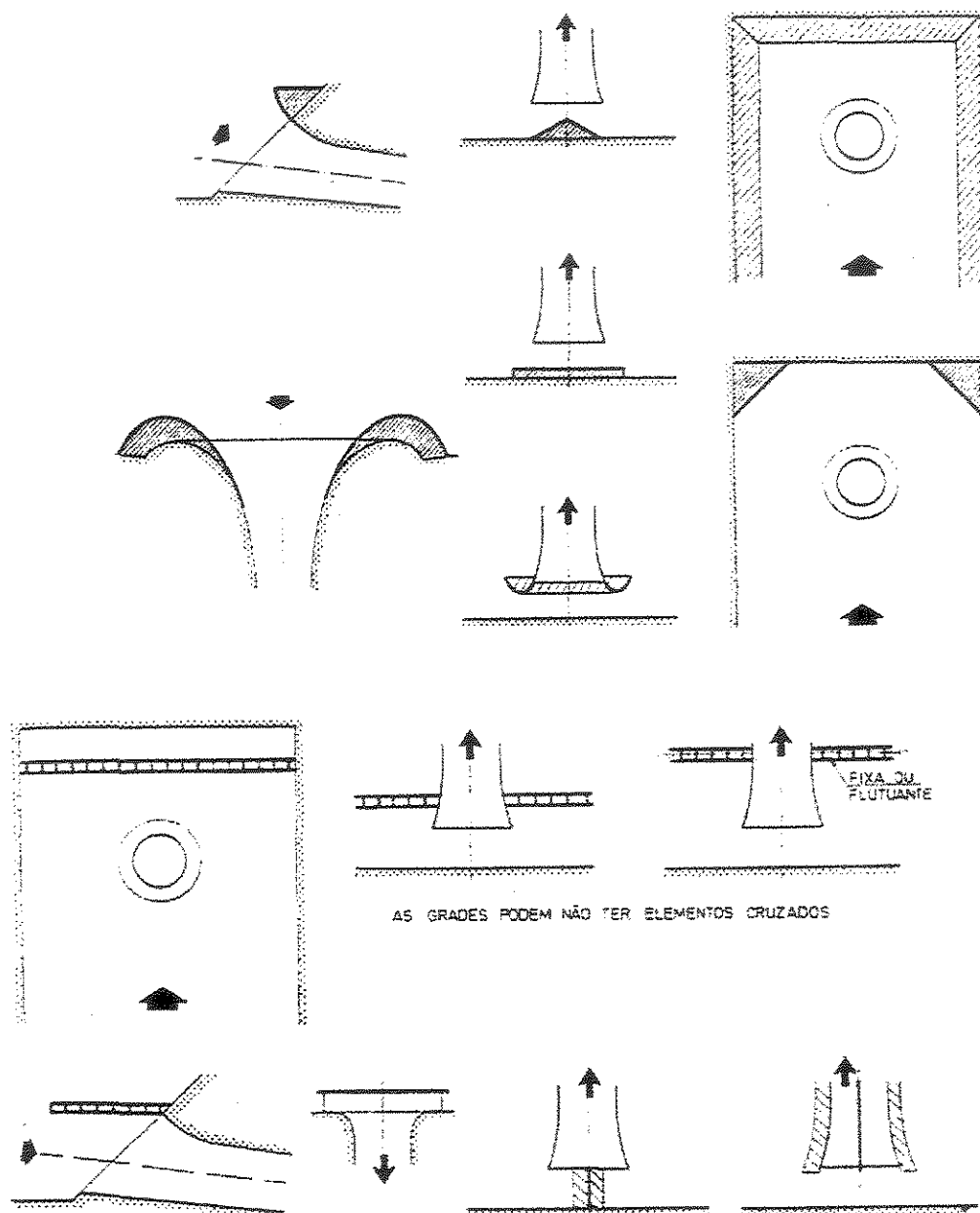


Figura 4.21 Dispositivos antivórtices, segundo MARTIM (1983).

PADMANABHAN E HECKER (1984) realizaram um estudo experimental comparando os dados de um poço de sucção (protótipo) e dois modelos físicos (escala 1:2 e 1:4) para avaliar o efeito de escala. Para uma melhor avaliação, fizeram uma classificação dos vórtices segundo a intensidade, conforme mostrado na Figura 4.22 e descrito na Tabela 4.1.

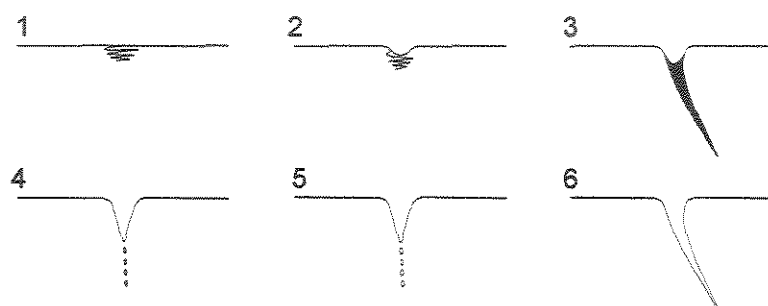


Figura 4.22 Tipos de vórtices, segundo PADMANABHAN E HECKER (1983).

Tabela 4.1 Descrição dos tipos de vórtice, segundo PADMANABHAN E HECKER (1983).

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

Segundo GULLIVER, RINDELS E LINDBLOM (1986), um dos maiores problemas nos projetos de tomadas d'água é a submersão necessária para se evitar a formação de vórtices, e propõem, para isso, critérios de projeto para as tomadas d'água na fase anterior à construção do modelo, pois no caso de aproveitamento de até 1MW pode não ser econômico construir modelos. Em suas pesquisas, determinaram que a submersão depende do diâmetro da tomada, do ângulo de aproximação do fluxo, das dimensões da estrutura próxima à tomada e no número de Froude da tomada.

Dados de 66 tomadas existentes e estudos em modelo foram colocados num gráfico de S/D em função do número de Froude, apresentado na Figura 4.23, definindo uma região ($F < 0,5$ e $S/D < 0,7$) em que a ocorrência de vórtice para tomadas horizontais é menos provável. Apesar disso, se a tomada tem condições muito irregulares de aproximação, pode haver a formação de vórtice, mesmo o ponto estando na região segura. Um aspecto interessante deste gráfico é que há pontos sem formação de vórtice para $F > 0,5$; isso ocorre devido às boas condições de aproximação da tomada, que imprimem ao fluido uma baixa circulação.

Através de um estudo em modelo, concluíram que a circulação depende da geometria da tomada e do ângulo de aproximação. Os modelos com semelhança de Froude representarão adequadamente o protótipo, desde que os números de Reynolds sejam elevados.

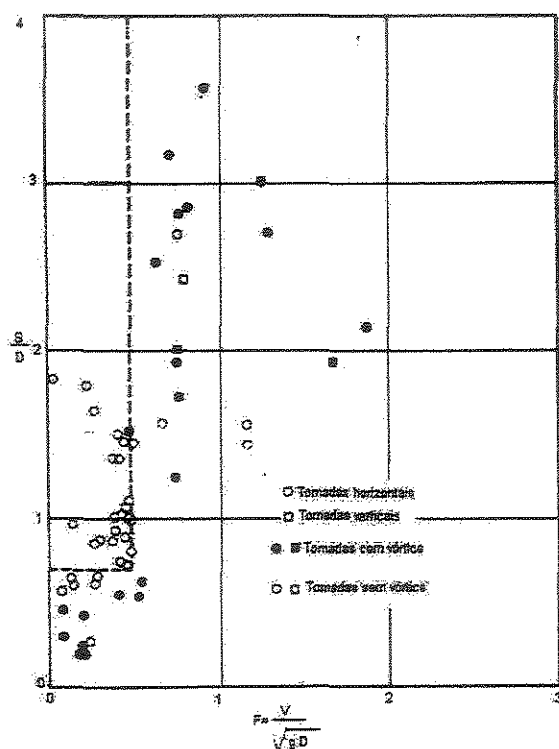
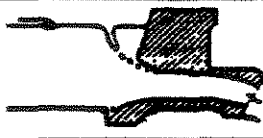
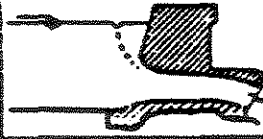
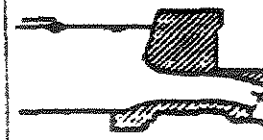


Figura 4.23 Gráfico da relação S/D em função do número de Froude segundo GULLIVER, RINDELS E LINDBLOM (1986).

Segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986), os diversos critérios existentes para estabelecer uma submersão mínima para evitar o aparecimento de vórtices nem

sempre levam a resultados confiáveis. Através de vários estudos em modelos reduzidos e informações de protótipos, mostrou-se que a formulação proposta por Gordon (1970) não é suficiente para avaliar o aparecimento de vórtices, pois o trabalho é restrito a tomadas horizontais de obras hidrelétricas. De acordo com o critério de Gordon, algumas tomadas apresentariam problemas de vórtice para os níveis mínimos de operação; através do estudo em modelo físico operado com a escala de Froude, essas tomadas indicaram situação crítica para grandes submergências, contrariando o critério de Gordon. Na Tabela 4.2 mostra-se uma classificação dos vórtices segundo sua intensidade feita pelos autores para facilitar os estudos.

Tabela 4.2 Classificação dos vórtices, segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986).

CLASSE I	Vórtice plenamente desenvolvido com núcleo contínuo de ar.	
CLASSE II	Vórtice claro, com formação de núcleo aerado profundo, com escape de ar, na forma de bolhas.	
CLASSE III	Cavado profundo, sem arrastamento de bolhas de ar, com núcleo bem definido visível por concentração de corante. Succionando pequenos flutuantes ao ar.	
CLASSE IV	Depressão superficial, seguida de núcleo bem definido de corante.	
CLASSE V	Depressão superficial, com núcleo instável com dispersão ocasional de corante.	
CLASSE VI	Movimento de rotação sem depressão, e núcleo indefinido com dispersão sistemática de corante.	
CLASSE VII	Circulação superficial apenas.	

Foi escolhida a tomada de uma usina hidrelétrica existente para um estudo mais detalhado, efetuando ensaios em modelo físico, com variação da submergência e da escala de velocidades, sendo os resultados obtidos apresentados na Figura 4.24.

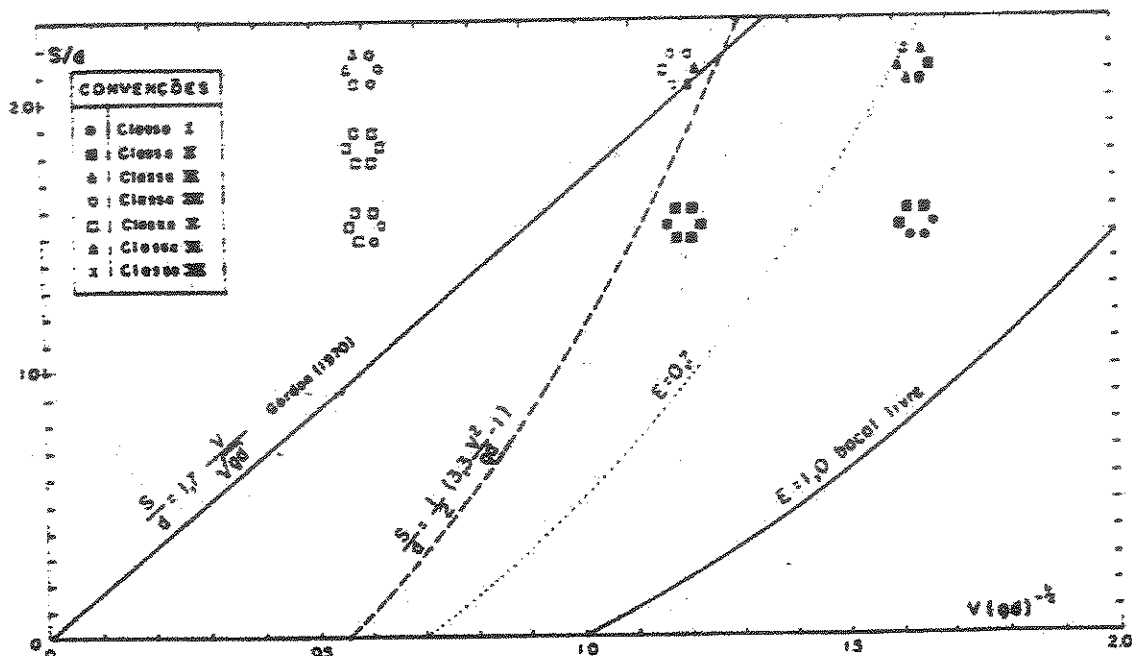


Figura 4.24 Resultados do modelo da tomada de água de Segredo, segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986).

Verifica-se que pelo limite de Gordon pode-se evitar vórtices do tipo I e II. Dentre os casos em que não houve o aparecimento de vórtices com arraste estão aqueles com condições favoráveis de aproximação, sendo o critério de Gordon bastante conservador.

Outro caso de simulação correta em modelo físico refere-se aos vórtices formados junto a comportas parcialmente abertas em vertedouros; este escoamento pode ser expresso por:

$$V = E [2g (S + D/2)]^{1/2} \quad (4.8)$$

na qual:

E = número de Euler

S = submergência

D = diâmetro da tomada

g = aceleração da gravidade

Na Figura 4.25 está apresentado um gráfico da classe do vórtice em função do número de Euler para dados de usinas hidrelétricas existentes e os obtidos no estudo em modelo realizado.

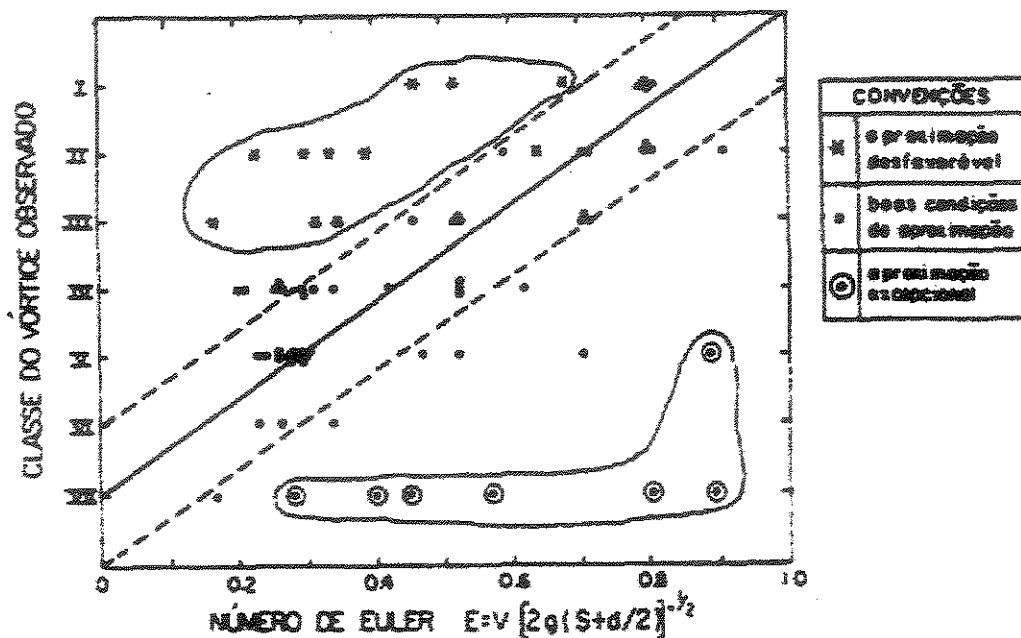


Figura 4.25 Relação entre classe do vórtice e número de Euler, segundo NEIDERT, TOZZI E OTA (1986).

Pode-se distinguir três grupos diferentes de tomadas d'água, em função das condições de aproximação:

- Condições desfavoráveis, não permitindo uma relação do vórtice com o número de Euler;
- Boas condições de aproximação, estabelecendo a seguinte relação para se evitar a formação de vórtices com arraste de ar:

$$\frac{S}{D} \geq \left(3,3 \frac{V^2}{gD} - 1 \right) \quad (4.9)$$

na qual:

S = submersão

D = diâmetro da tomada

V = velocidade na tomada

g = aceleração da gravidade

c. Condições de aproximação extremamente favoráveis ou que apresentam qualquer outra influência que tende a eliminar os vórtices.

Concluindo, os autores afirmam que os estudos em modelo físico devem ser utilizados, especialmente nos casos em que as condições de aproximação são desfavoráveis.

Para GULLIVER E RINDELS (1987), o comprimento do canal de aproximação de uma tomada contribui para a redução da circulação, sendo um dos motivos o atrito das paredes laterais do canal. Para investigar a submergência crítica na formação de vórtices persistentes, fizeram um estudo experimental em modelo, que consistia de um canal (com tomada vertical) onde se variava o comprimento das paredes; um vórtice que durasse pelo menos 10 s foi considerado como persistente. A dificuldade de se determinar a submergência é causada pelo fato da formação de vórtice ser um fenômeno de transição de um fluxo meramente radial para um escoamento com vórtice.

O número de Froude do modelo variou de 0,25 a 2,2 em 13 arranjos diferentes de L/B e ângulo de aproximação, sendo L, a distância da entrada do canal até o eixo da tomada e B, a largura do canal; resultados indicaram uma relação mínima S/D de 2,5 a 7 para evitar vórtices com arraste, sendo a relação L/B e o ângulo de aproximação (desde que seja maior que 15°) parâmetros importantes.

Além disso, chegaram à seguinte fórmula da submergência para evitar a formação de vórtices:

$$\frac{S}{D} = 2,5 + \frac{4}{3} F^{\frac{2}{3}} + 40 N_{\Gamma}^*{}^3 \quad (4.6)$$

na qual:

F = número de Froude

S = submergência

D = diâmetro da tomada

$N_{\Gamma}^* = \alpha/[1+(L/B) \tan \alpha]$ = parâmetro circulação

L = distância da entrada do canal até a linha do centro da entrada

B = largura do canal.

α = ângulo de aproximação do fluxo

SINNIGER e HAGER (1989) fizeram uma revisão de diversos trabalhos existentes sobre o fenômeno de formação de vórtices, destacando os principais aspectos relacionados à submergência crítica para evitar o aparecimento de vórtices com arraste de ar. Considerando uma tomada horizontal em um canal retangular a submergência crítica é:

$$S/D \geq V/(gD)^{1/2} \quad (4.7)$$

LEVI (1991) vem realizando há mais de 40 anos estudos sobre o princípio de formação de vórtices, como se dá seu desenvolvimento e os seus efeitos prejudiciais. Através do estudo em modelo de uma bacia de dissipação, observou vórtices intermitentes que se desenvolvem espontaneamente através de vertedores ou embaixo de comportas planas, admitindo a utilização da lei universal de Strouhal, capaz de prognosticar a frequência das oscilações provocadas, a frequência dos vórtices e as vibrações estruturais que o fenômeno pode evidenciar.

CASAMASSA NETO (1991) fez uma revisão de vários trabalhos existentes sobre formação de vórtices em tomadas d'água, destacando formulações teóricas do fenômenos, causas e maneiras de prevenção, além dos vários critérios de se estimar a submergência crítica, estudados anteriormente.

Segundo GULLIVER e ARNDT (1991) há uma grande variedade de dispositivos antivórtices, classificados em quatro categorias:

1. *Guias de fluxo*: Longos canais de aproximação ou paredes de canais são projetados de forma que permitam a eliminação das zonas de separação, reduzindo, assim, a circulação.

2. *Redutores da rotação*: Um dos mais eficientes dispositivos deste tipo é uma balsa submersa, como se mostra na Figura 4.26.a, que consiste de uma grade de aço que pode servir também como uma grelha para segurar o lixo. Uma espécie de cunha acima da tomada, apresentada na Figura 4.26.b, também é usada. Para tomadas menores com altas velocidades, uma cobertura na tomada, mostrada na Figura 4.26.c, tem se mostrado eficiente, além de seu custo não ser alto.

3. *Redução na velocidade da tomada*: Uma outra maneira para se evitar vórtices é diminuir a velocidade da tomada aumentando a área da sua seção

transversal. Na Figura 4.26.d mostra-se uma cobertura que aumenta a área e transforma a tomada vertical em horizontal.

4. *Dispositivos de perda de energia*: Uma perda significativa de energia irá comprimir a aproximação do fluxo, independente de estar próxima ou afastada da tomada. O problema deste dispositivo é que sua eficiência é proporcional à quantidade de energia perdida.

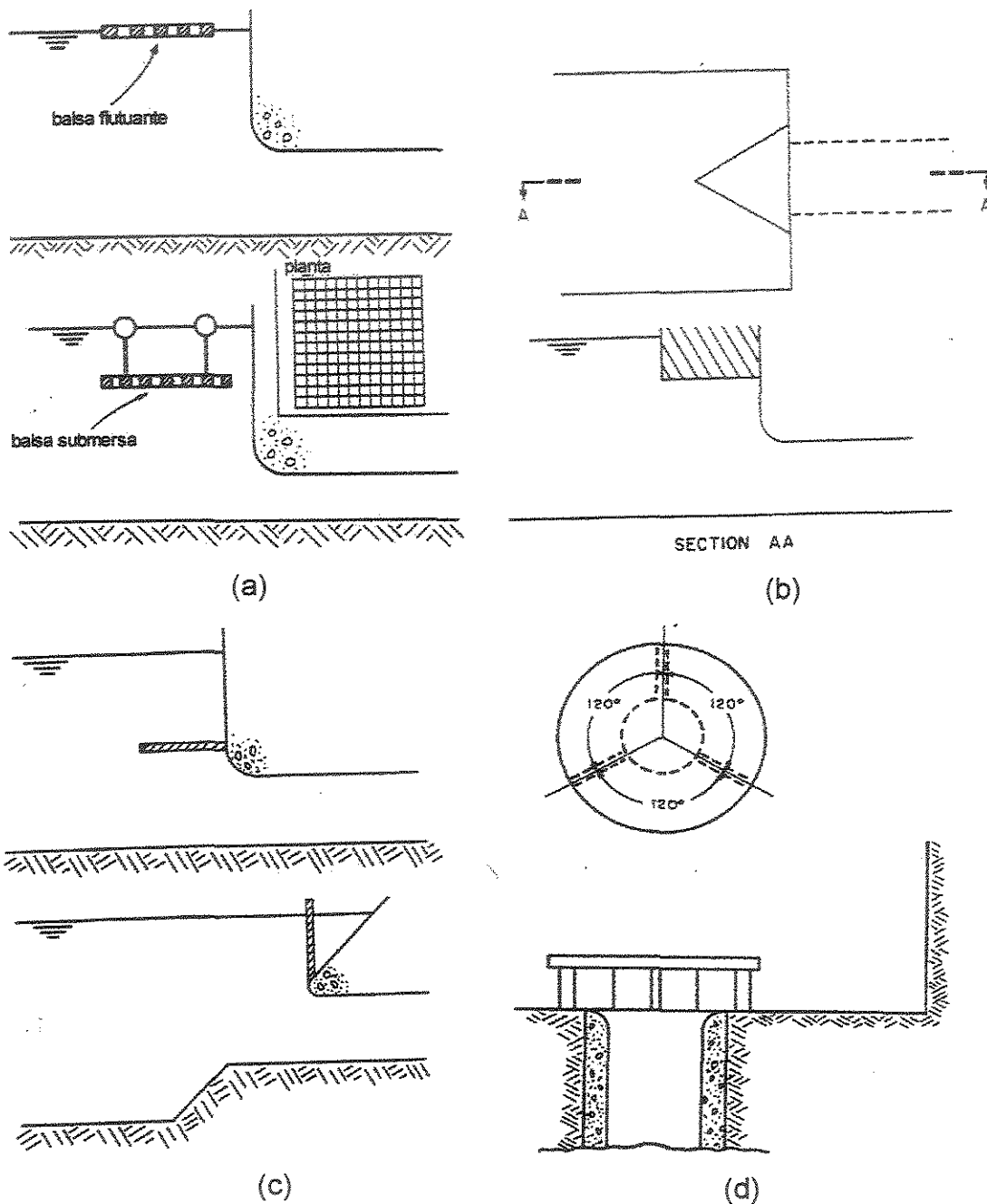


Figura 4.26 Dispositivos antivórtice, segundo GULLIVER e ARNDT (1991).

Para determinar a submergência crítica em um canal com fluxo uniforme, YILDRIM E KOCABAS (1995) realizaram estudo em modelo em um canal retangular com uma tomada vertical. Foi definida como submergência crítica, a submergência necessária para evitar o aparecimento de vórtices com arraste de ar.

Os autores afirmam que a submergência crítica é igual ao raio da uma superfície esférica imaginária, chamada de superfície esférica crítica (CSSS), que tem o mesmo centro e vazão da tomada e onde a velocidade radial é igual à metade da velocidade do canal de aproximação da tomada. A figura 4.27 mostra algumas superfícies típicas para deferentes posições da tomada.

Por exemplo, para a Figura 4.27.b, a área da CSSS é $[4\pi S^2 - 2\pi S(S - c)]$ e a submergência crítica é:

$$Q = [4\pi S^2 - 2\pi S(S - c)] \frac{U_\infty}{2} = C_d V \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.8)$$

$$\frac{S}{D} = \left[-\frac{c}{D} + \sqrt{\left(\frac{c}{D}\right)^2 + \frac{C_d V}{U_\infty}} \right] / 2 \quad (4.9)$$

na qual:

Q = vazão na tomada

S = submergência da tomada

c = altura da tomada em relação ao fundo do canal

U_∞ = velocidade de aproximação do fluido

C_d = coeficiente de vazão da tomada

V = velocidade do fluido na tomada

D = diâmetro da tomada

Os resultados experimentais demonstraram uma boa concordância entre valores teóricos e experimentais, mostrando também que esta teoria não se adapta aos casos em que $C_d V / U_\infty < 2$ ou $S/D < 0,5$, sendo C_d o coeficiente de descarga da tomada, V a velocidade na tomada, U_∞ = velocidade do fluxo na canal à montante da tomada, S_c a submergência crítica e D o diâmetro da tomada.

Superfície esférica crítica

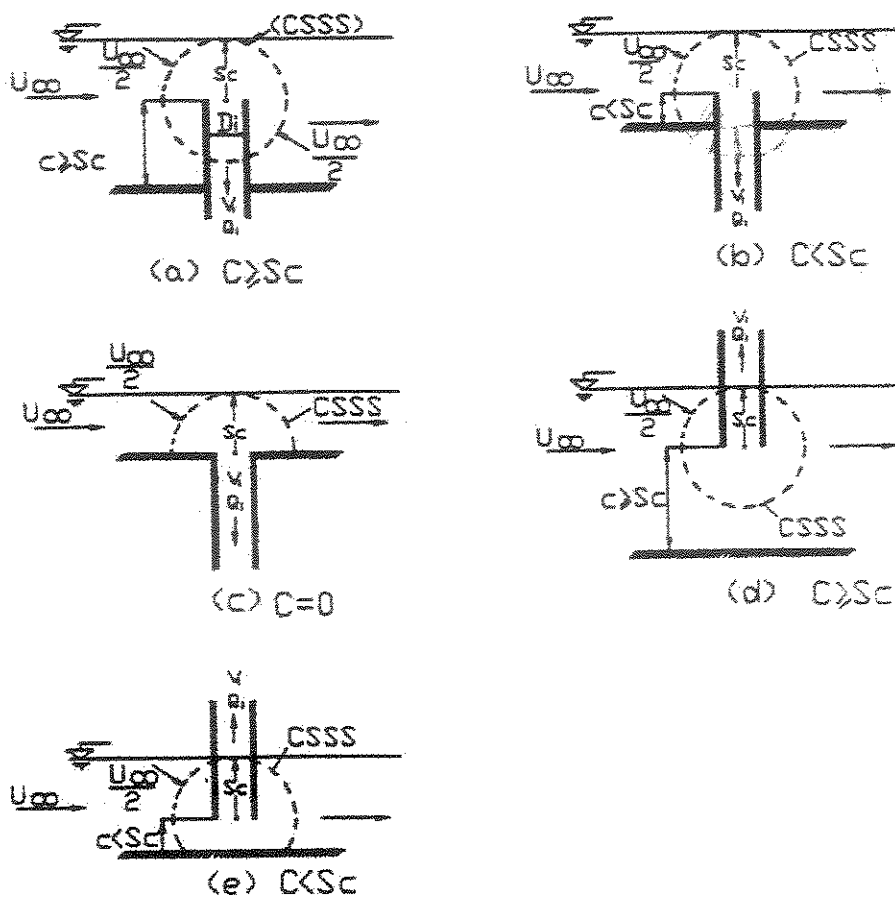


Figura 4.27 Típicas superfícies esféricas críticas em tomadas d'água, segundo YILDRIM e KOCABAS (1995)

ALDAPE E REINA (1996), em seu trabalho, tiveram como objetivo estimar o efeito de escala devido à tensão superficial a partir de perfis de vórtices tirados de fotografias. Para isso, realizaram estudos experimentais em um tanque cilíndrico com um orifício de 0,044m de diâmetro no fundo. Na Figura 4.28 mostra-se um gráfico com o perfil real de um vórtice e o perfil para tensão superficial igual a zero, de onde se pode concluir que para vórtices com penetração parcial de ar, o efeito da tensão superficial está na ponta do vórtice e este efeito diminui à medida que se aumenta a circulação. Afirmou-se ainda que o número de Weber para o qual há a influência da tensão superficial varia entre 41 e 68 (sendo usados a vazão e o raio da tomada), para valores

de circulação até $0,075 \text{ m}^2/\text{s}$. O aumento da velocidade de rotação, bem como o aumento da tensão superficial, são as causas da instabilidade na ponta do vórtice.

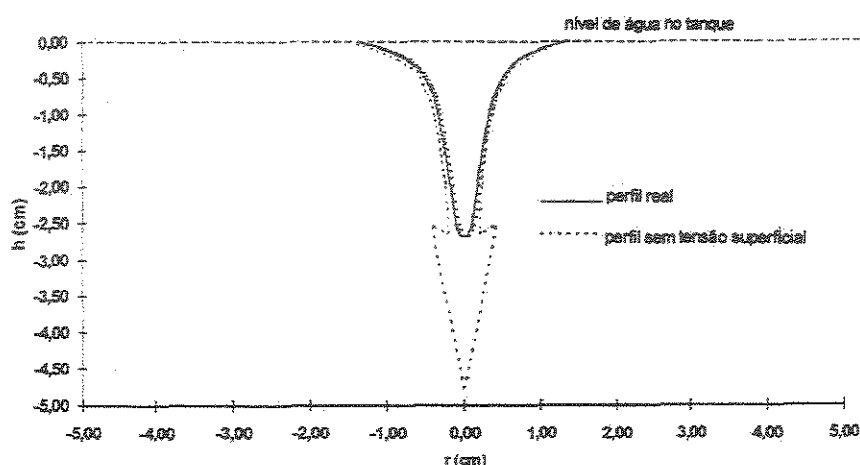


Figura 4.28 Perfil de vórtice com e sem tensão superficial, segundo ALDAPE E REINA (1996).

Em um outro trabalho, YILDIRIM E KOCABAS (1998) fizeram um estudo em modelo para reservatório e analisaram o conceito da CSSS (já discutido em seu trabalho anterior) para reservatórios de água parada, com tomada vertical, concluindo que este também é válido neste caso. Os diâmetros das tomadas ensaiadas variaram de 0,036m a 0,085m.

Os resultados obtidos nos ensaios foram colocados em um gráfico da vazão em função da área da CSSS, mostrado na Figura 4.29 e outro de Sc/D em função da velocidade da tomada, apresentado na Figura 4.30. Observando o gráfico, nota-se que a submersão varia com a distância da tomada ao fundo do reservatório.

FERREIRA, BORIN E GENOVEZ (2000) realizaram um estudo em modelo para determinar a submersão crítica em tomadas d'água verticais. Foi empregado um reservatório de 3,40m de lado, colocado a 2,50m de altura, com a tomada vertical colocada no centro do reservatório, sendo utilizados dois diâmetros para avaliar a existência do efeito de escala. Foi concluído que a submersão mínima necessária para evitar o arraste de ar é $S/D = 0,5$, sendo que para valores de $S/D > 3,0$, não há a formação de vórtices. Além disso, somente para casos de vórtice sem arraste de ar há uma pequena influência da relação H/D , onde H é a altura da tomada em relação ao fundo do reservatório.

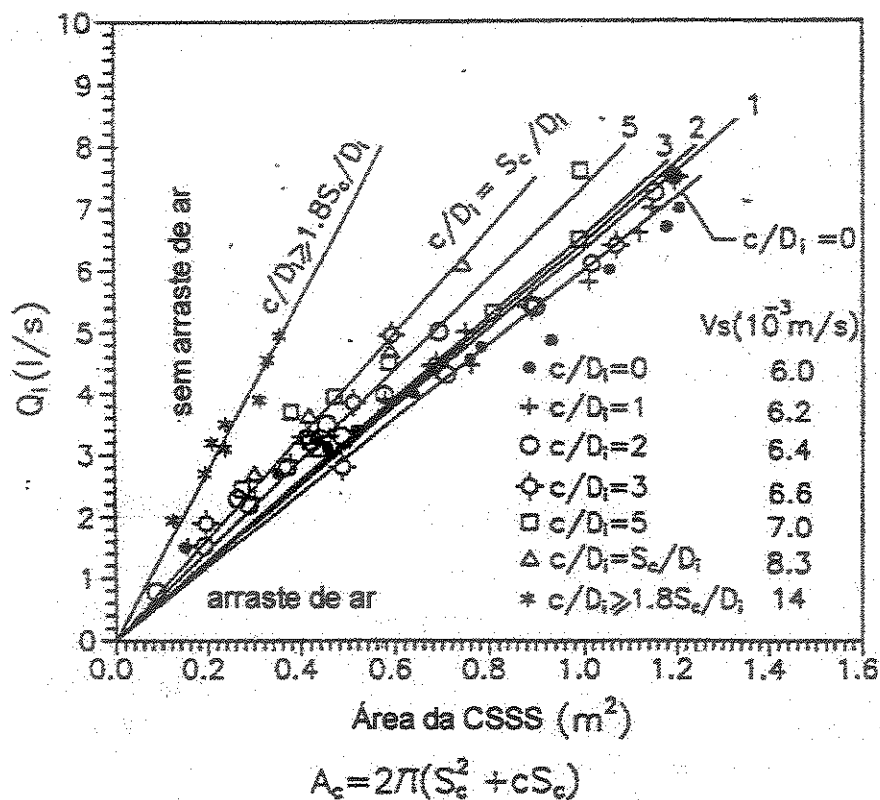


Figura 4.29 Relação entre a vazão e a área da CSSS, segundo YILDIRIM E KOCABAS (1998).

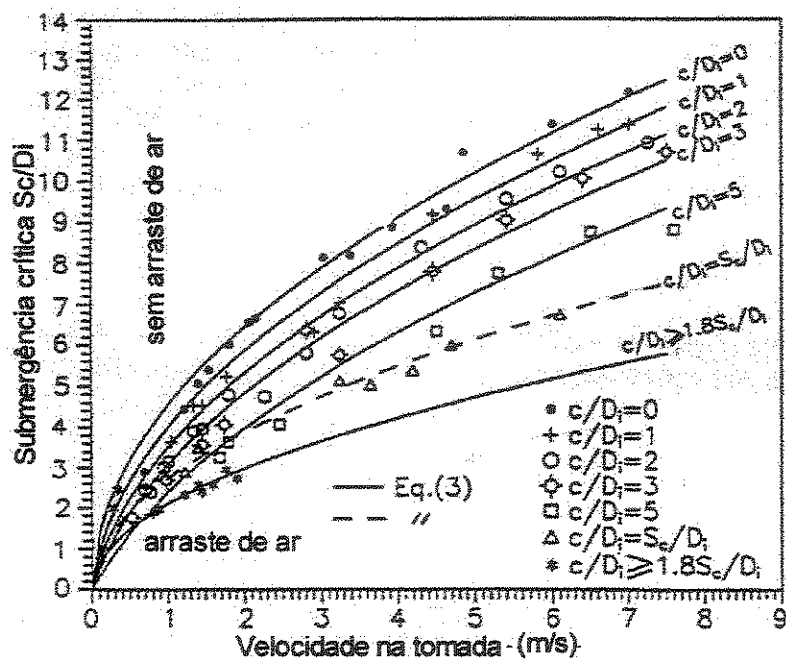


Figura 4.30 Gráfico da submergência crítica em função da velocidade na tomada, segundo YILDIRIM E KOCABAS (1998).

4.3 Conclusão

Concluindo, não há critério de projeto definido para as tomadas verticais que exigem uma submersão maior que no caso das tomadas horizontais.

5 METODOLOGIA

Este capítulo será dividido em duas partes. Na primeira parte, será apresentado o banco de ensaio empregado no trabalho experimental e, na segunda parte, serão indicados os equipamentos de medição a serem utilizados, para finalmente descrever a metodologia de ensaio.

5.1 Banco de Ensaio

Para a realização desta pesquisa foi empregado o banco de ensaio existente no Laboratório de Hidráulica e Mecânica dos Fluidos da Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas. A representação do reservatório foi realizada com o auxílio de uma caixa de concreto de 3,40m de lado, colocada a 2,50m de altura. A tomada d'água foi colocada no interior do reservatório.

Para poder representar a aproximação da água, entre a parede do reservatório e a posição da tomada d'água existe uma parede tranquilizadora circular de 0,15 m de espessura, conforme GENOVEZ (1997). A alimentação ao modelo foi feita por meio de uma tubulação de 0,15 m de diâmetro, colocada no fundo do reservatório de concreto. Um sistema de duas bombas recalca água do reservatório inferior até a instalação de ensaio.

No centro do reservatório de concreto foi colocada a tubulação de PVC representando a tomada d'água. Esta tubulação foi fixada verticalmente com o auxílio de uma flange, a qual permitiu também, a variação da altura da tomada. Para garantir a verticalidade foram usados níveis de bolha. É muito importante que a tomada esteja na

posição vertical e sua borda horizontal para não provocar a formação de vórtices devido a irregularidades na geometria. A tubulação vertical foi unida à tubulação de descarga por meio de uma curva de mesmo diâmetro, fixadas convenientemente por meio de suportes, ao piso do laboratório. Foram empregadas tomadas de 0,075m , 0,100m e 0,125 m de diâmetro. Na tubulação de descarga, foi instalado um registro para regular a vazão a ser descarregada. Um esquema geral da instalação experimental pode ser visto na Figuras 5.1 e na Foto 5.1.

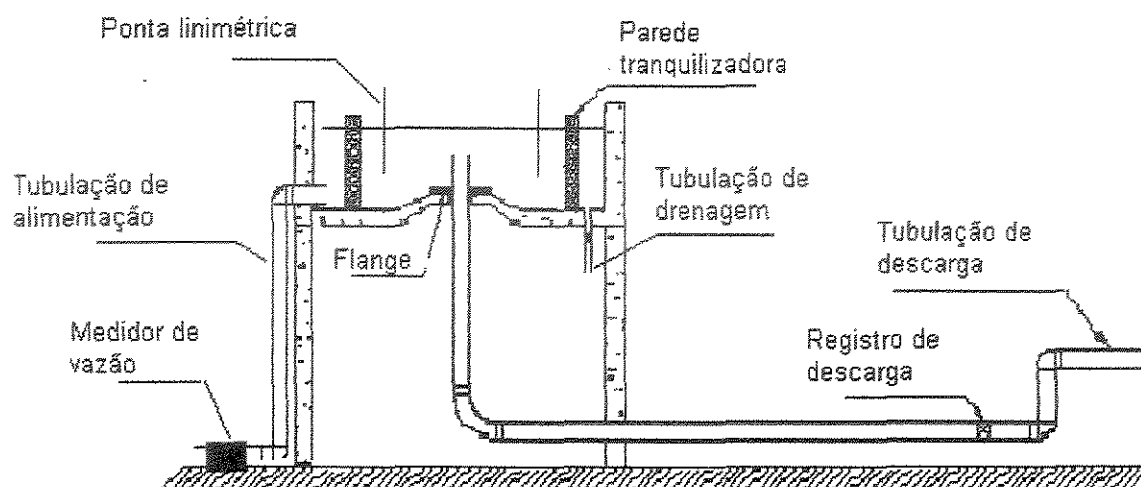


Figura 5.1 Esquema geral do banco de ensaio.

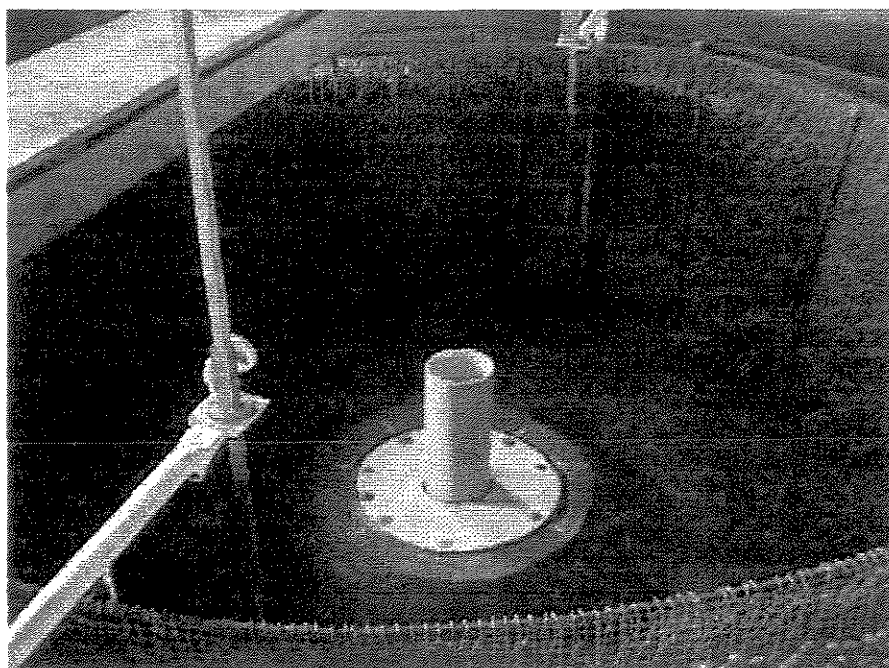


Foto 5.1 Foto da tomada d'água vertical instalada dentro do reservatório.

5.2 Equipamento de Medição

A medição dos níveis de água dentro do reservatório foi feita por meio de duas pontas linimétricas (0,80 m, precisão de 0,1mm) instaladas diametralmente opostas, visando verificar uma possível desuniformidade na aproximação da água ao modelo. Para se controlar as vazões na tomada, foi colocado um registro na tubulação de descarga. A medição das vazões foi feita com o auxílio de medidor ultra-sônico instalado na tubulação de alimentação (system 990 Uniflow que opera na faixa de diâmetro de 0,0635m a 9,144m), tomando-se o cuidado de garantir o escoamento a seção plena na tubulação onde está fixado o ultra-som (já que o medidor ultra-sônico não consegue medir vazões, quando a seção da tubulação não está completamente cheia de água).

Para medir o arraste de ar, no caso de formação de vórtices com arraste de ar, foi usado um anemômetro (0,20 m/s a 20,00 m/s; limite de erro de 2%). O anemômetro foi instalado numa campânula montada em cima da tomada, mostrada na Foto 5.2, que descia para fazer a medição do ar arrastado pelo núcleo de ar formado, tomando-se o cuidado de controlar para que a borda inferior da campânula estivesse dentro d'água para assegurar a medição de toda a vazão arrastada.

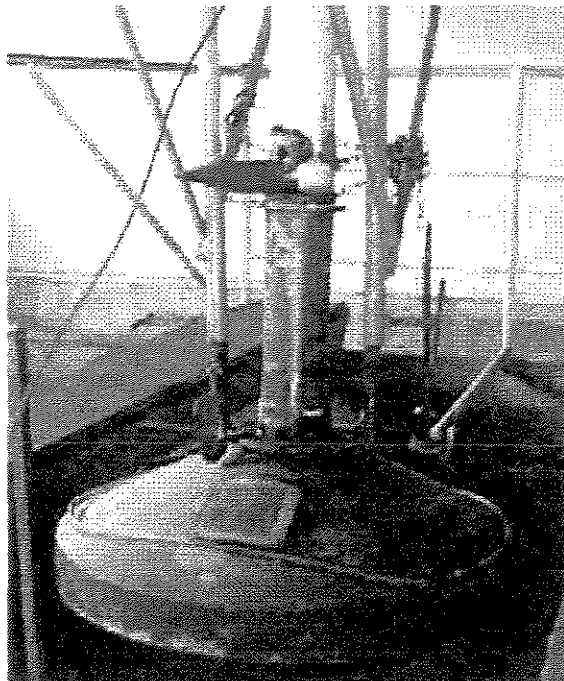


Foto 5.2 Campânula montada sobre a tomada de água.

5.3 Metodologia de ensaio

Neste trabalho, foi definida como H , a altura da tomada d'água em relação ao fundo do reservatório, como S , a altura de lâmina d'água acima da crista da tomada e como D , o diâmetro da tomada, conforme apresentado na Figura 5.3.

Foram utilizadas tubulações com três diâmetros diferentes, 0,075m, 0,100m e 0,125m, para poder avaliar o efeito de escala. Para cada diâmetro foram variadas a altura da tomada em relação ao fundo e a submergência.

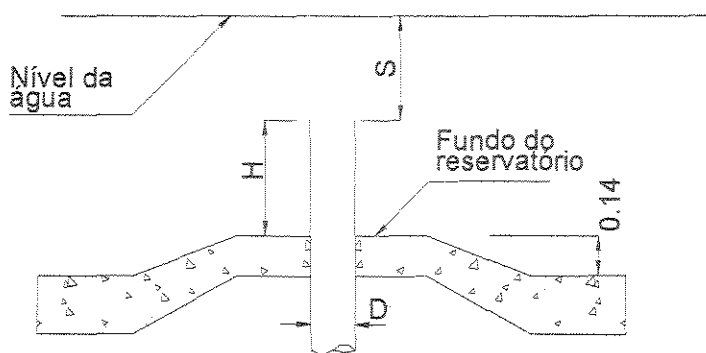


Figura 5.2 Representação esquemática da tomada d'água.

Uma vez fixada a relação escolhida H/D , encheu-se o reservatório até atingir a relação S/D proposta. A altura da lâmina d'água S foi medida com o auxílio das pontas linimétricas. Estabilizado o nível no reservatório (o ajuste do nível foi feito pelo registro instalado na tubulação de alimentação e pelo registro da tubulação de descarga), observou-se se havia formação de vórtices para a vazão correspondente àquele nível d'água. Se houvesse a formação imediata de vórtice com arraste de ar, este era medido e passava-se para a medida seguinte; caso contrário, a observação seria feita durante uma hora, verificando se haveria ou não a formação de vórtices e qual o tipo de vórtice formado. Após esse período, mantendo-se o mesmo nível d'água no reservatório, fechou-se o registro de descarga até atingir uma nova vazão e prosseguiu-se o roteiro de medições já definido.

Para cada relação S/D foram feitas medições com a vazão máxima e mínima e duas vazões intermediárias. Após os ensaios com a primeira relação S/D passou-se

para a outra relação e assim sucessivamente. Uma vez concluídas as relações S/D passou-se para a nova relação H/D e o ciclo recomeçou até que se completassem os ensaios propostos.

As relações H/D e S/D escolhidas foram as seguintes:

- *Tubo de 0,075m*: H/D 0,5; 1,5; 3,0 e S/D 0,5; 1,0; 2,5
- *Tubo de 0,100m*: H/D 0,5; 1,0; 2,0; 3,0 e S/D 0,5; 1,0; 2,0; 3,0.
- *Tubo de 0,125m*: 0,5; 1,0 e 2,5 e S/D 0,5; 1,0; 2,5.

Através da metodologia apresentada, foram feitos os ensaios das três tomadas d'água.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos com a realização dos ensaios de acordo com a metodologia descrita.

6.1 Tipos de vórtice

De acordo com a metodologia descrita no Capítulo 5, para cada ensaio foi feita a classificação do tipo de vórtice formado: de fraco, tipo 1 a intenso, tipo 6 (com arraste de ar), de acordo com a caracterização de PADMANABHAN E HECKER (1983). Os resultados obtidos nos ensaios estão apresentados nas Tabelas 6.1.a, 6.1.b e 6.1.c, para os diâmetros de 0,075m, 0,100m e 0,125m, respectivamente, onde H/D é a relação entre a distância da tomada, referida ao fundo de reservatório, e o diâmetro da tomada; S/D é a relação entre a submersão e o diâmetro da tomada e Q é a vazão líquida da tomada.

Na Foto 6.1 mostra-se um vórtice intenso, tipo 6, formado na tomada de 0,075m.

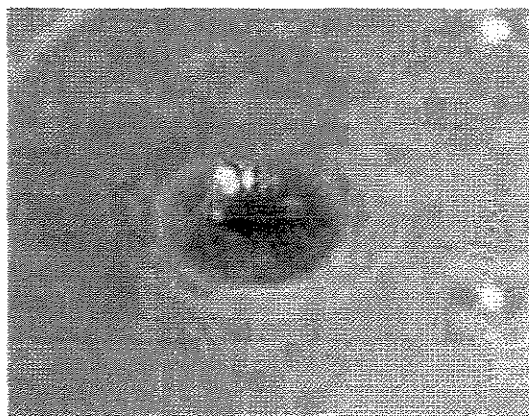


Foto 6.1 Vórtice tipo 6 formado na tomada de 0,075m.

Tabela 6.1.a Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,075\text{m}$

<i>H/D</i>	<i>S/D</i>	<i>Q (L/s)</i>	Observações	Tipo de vórtice
0,5	0,5	7,00	Vórtice com arraste ($V = 0,5 \text{ m/s}$).	6
		5,05	Vórtice com arraste (pouco).	6
		3,40	Pequenas depressões instáveis	2
		1,60	Não houve formação de vórtice.	—
	1	14,10	Pequenas depressões que se e desapareciam. Movimento desordenado.	2
		10,70	Idem ao anterior, mas um pouco mais lento.	2
		7,05	Pequenas depressões instáveis	2
		3,50	Idem ao anterior, água quase parada.	1
	2,5	14,20	Não houve formação de vórtice.	—
		10,30	Não houve formação de vórtice.	—
		7,06	Não houve formação de vórtice.	—
		3,44	Não houve formação de vórtice.	—
1,5	0,5	7,27	Vórtice com arraste ($V = 0,4 \text{ m/s}$)	6
		5,40	Vórtice com arraste (pouco)	6
		3,50	Pequenas depressões instáveis. Às vezes juntava com outra e desaparecia.	2
		1,90	Pequenas depressões fracas e estáveis	2
	1,5	14,50	Pequenas depressões instáveis que se juntavam e desapareciam.	2
		10,95	Pequenas depressões instáveis.	2
		6,93	Pequenas depressões . Água quase parada.	1
		3,60	Pequenas depressões. Água quase parada	1
	2,5	14,15	Sem formação de vórtice.	—
		10,57	Sem formação de vórtice.	—
		7,35	Sem formação de vórtice.	—
		3,60	Sem formação de vórtice.	—
3,0	0,5	7,20	Vórtice com arraste ($V = 0,5 \text{ m/s}$)	6
		5,15	Vórtice com arraste ($V = 0,4 \text{ m/s}$)	6
		3,65	Pequenas depressões que se juntavam e desapareciam. Movimento desordenado.	2
		1,90	Pequenas depressões fracas e estáveis	2
	1,5	14,60	Pequenas depressões que se juntavam e desapareciam.	2
		10,70	Pequenas depressões instáveis.	2
		7,30	Pequenas depressões estáveis.	1
		3,51	Pequenas depressões.	1
	2,5	13,90	Sem formação de vórtice.	—
		10,40	Sem formação de vórtice.	—
		7,10	Sem formação de vórtice.	—
		3,30	Sem formação de vórtice.	—

Tabela 6.1.b Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,100\text{m}$.

H/D	S/D	$Q \text{ (L/s)}$	Observações	Tipo de vórtice
1	0,5	11,56	Vórtice com arraste ($V = 0,5 \text{ m/s}$)	6
		8,49	Vórtice com arraste (pouco).	6
		5,78	Pequenas depressões instáveis	2
		2,95	Pequenas depressões instáveis.	2
	1	21,30	Pequeno vórtice que às vezes se juntava com outro e desaparecia. Às vezes formava pequeno cone.	3
		15,10	Idem ao anterior.	3
		10,15	Vórtice com núcleo e cone de ar.	3
		5,20	Idem ao anterior.	3
	2	20,05	Pequenas depressões que formavam e desapareciam. Movimento muito lento.	1
		15,30	Idem ao anterior.	1
		10,05	Pequenas depressões que formavam e desapareciam. Movimento muito lento.	1
		5,15	Pequenas depressões.	1
	3	20,10	Pequeno vórtice.	2
		15,05	Pequena depressão, água quase parada.	1
		10,20	Idem ao anterior.	1
		5,10	Idem ao anterior.	1
2	0,5	11,53	Vórtice com arraste ($V = 0,5 \text{ m/s}$)	6
		8,62	Vórtice com arraste (pouco).	6
		5,82	Pequenas depressões instáveis	2
		3,13	Pequenas depressões fracas e estáveis	1
	1	21,15	Movimento desordenado. Às vezes se formavam 2 pequenos vórtices que se juntavam e desapareciam.	2
		15,20	Idem anterior, bem menos intensos e freqüentes. Água quase parada.	1
		9,90	Idem anterior.	2
		5,10	Pequeno vórtice com núcleo. Às vezes diminuía mas não desaparecia.	2
	2	20,40	Pequena depressão.	2
		15,20	Pequena depressão.	2
		10,11	Pequena depressão. Água quase parada.	1
		5,15	Pequena depressão. Água quase parada.	1
	3	22,25	Pequenas depressões, poucos duradouras. Água parada durante muito tempo.	—
		14,80	Idem ao anterior.	—
		10,10	Não houve formação de vórtice.	—
		5,15	Não houve formação de vórtice.	—

continua

Tabela 6.1.b Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,100\text{m}$

continuação

3	0,5	11,21	Vórtice com arraste ($V = 0,6 \text{ m/s}$)	6
		8,70	Vórtice com arraste (pouco) um pouco abaixo da ponta	6
		5,58	Pequenas depressões instáveis	2
		2,90	Pequenas depressões estáveis	1
	1	22,00	Perturbações.	2
		14,90	Perturbações com formação de pequenos vórtices com núcleo que se formavam e desapareciam rapidamente.	2
		10,20	Idem ao anterior, com vórtices sem núcleo, à vezes 2 juntavam-se e desapareciam.	2
		5,15	Vórtice pequeno com núcleo e estável. Sem cauda.	3
	2	22,00	Movimentos circulares com pequena depressão, instáveis, em certos momentos água parada.	1
		15,50	Vórtice pequeno com núcleo de ar e cauda. Desapareceu e formaram vórtices instáveis.	2
		10,10	Pequena depressão por muito tempo que desapareceu, não retornando novamente.	1
		5,17	Pequena depressão por muito tempo, que diminuiu aos poucos, porém, não desapareceu.	1
	3	23,10	Vórtice pequeno e instável, sem arraste de ar.	2
		16,70	Sem vórtice.	—
		10,10	Sem vórtice.	—
		6,01	Sem vórtice.	—
0,5	0,5	14,35	Vórtice com arraste ($V = 0,4 \text{ m/s}$)	6
		10,53	Vórtice com arraste (pouco)	6
		6,90	Pequenas depressões instáveis	2
		3,48	Pequenas depressões estáveis	2
	1	17,28	Pequenas depressões instáveis	2
		13,12	Pequenas depressões estáveis	2
		9,25	Pequenas depressões estáveis, mais fracas que as anteriores	1
		5,06	Pequena depressão muito fraca, quase imperceptível	1
	1,5	17,10	Pequeno vórtice com núcleo	2
		13,21	Pequeno vórtice com núcleo	2
		9,25	Pequenas depressões instáveis	1
		5,14	Pequenas depressões instáveis	1

Tabela 6.1.c Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,125\text{m}$.

<i>H/D</i>	<i>S/D</i>	<i>Q (L/s)</i>	Observações	Tipo de vórtice
2,5	0,5	22,70	Vórtice com arraste ($V = 2,2 \text{ m/s}$)	6
		17,50	Vórtice arraste (pouco)	6
		12,05	Pequenos vórtices com núcleo que se juntavam e desapareciam	3
		7,10	Idem anterior	3
	1	55,50	Iminência de formação.	3
		40,35	Pequenas depressões instáveis	2
		27,20	Pequenas depressões. Água quase parada	1
		13,90	Pequenas depressões. Água quase parada	1
	2,5	53,50	Sem vórtice.	—
		41,55	Sem vórtice.	—
		27,80	Sem vórtice.	—
		14,60	Sem vórtice.	—
1	0,5	21,35	Vórtice com arraste ($V = 2,2 \text{ m/s}$)	6
		16,50	Vórtice com arraste	3
		10,44	Pequenos vórtices instáveis	2
		5,50	Depressões instáveis. Água quase parada	1
	1	45,30	Pequeno vórtice com núcleo. Às vezes uma pequena "cauda" com pouco arraste	5
		35,00	Pequeno vórtice com núcleo, um pouco instável. Às vezes um pouco de arraste.	2
		24,00	Pequeno vórtice, com núcleo, estável.	2
		11,80	Pequeno vórtice, com núcleo, estável. Às vezes um pouco de arraste.	1
	2,0	57,60	Pequenas depressões instáveis	2
		15,60	Pequenas depressões. Água quase parada	1
	2,5	55,60	Sem vórtice.	—
		41,70	Sem vórtice.	—
		27,30	Sem vórtice.	—
		14,15	Sem vórtice.	—
0,5	0,5	23,30	Vórtice com arraste ($V = 2,2 \text{ m/s}$)	6
		17,20	Vórtice com arraste (pouco), um pouco abaixo da ponta	6
		11,30	Pequenas depressões, instáveis	2
		5,30	Pequeno vórtice, estável, com núcleo	2
	1	46,70	Iminência de formação.	3
		34,60	Pequenos vórtices instáveis que às vezes se juntavam e sumiam.	2
		25,64	Pequenas depressões instáveis, (às vezes) com núcleo. Movimento mais lento que o anterior.	1
		10,05	Depressão estável. Água quase parada.	1

continua

Tabela 6.1.c Dados obtidos nos ensaios, $D = 0,125m$
continuação

2,0	54,50	Pequenas depressões	1
	13,30	Pequenas depressões	1
2,5	48,20	Sem vórtice.	—
	36,10	Sem vórtice.	—
	24,50	Sem vórtice.	—
	12,10	Sem vórtice.	—

6.2 Análise dos resultados

Para avaliar a frequência dos tipos de vórtice que apareceram nas tomadas para diferentes condições de descarga e submergência, foi feito um gráfico do tipo de vórtice em função da frequência, como mostra-se na Figura 6.1. Observa-se que o diâmetro da tomada tem pouca influência o tipo de vórtice formado, pois as tendências observadas nas três tomadas são bastante semelhantes. Pôde-se constatar que em 50% do tempo apareceram vórtices do tipo 2.

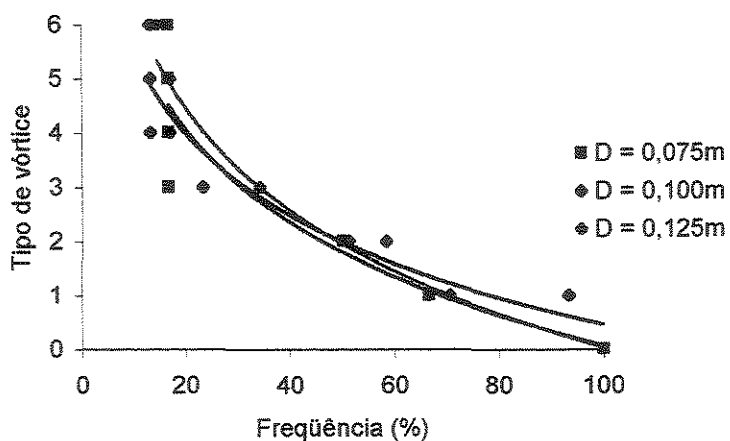


Figura 6.1 Gráfico do tipo de vórtice em função da frequência.

Através da análise dimensional, Anwar (1978) citado por PADMANABHAN E HECKER (1983), estabeleceu que os parâmetros adimensionais importantes na

formação de vórtice são respectivamente: adimensional da submergência, número de Froude, número de Reynolds, número de Weber e número de Reynolds radial.

$$\frac{S}{D}, \frac{V}{\sqrt{gD}}, \frac{VD}{\nu}, \frac{\rho DV^2}{\sigma}, \frac{Q}{\nu S}$$

sendo

S = submergência da tomada, V = velocidade de aproximação do fluido, D = diâmetro da tomada, g = aceleração da gravidade, ν = viscosidade cinemática do fluido, ρ = massa específica do fluido, σ = tensão superficial do fluido.

Para todos os ensaios foram calculados os valores dos números de Froude, Reynolds, Reynolds radial e Weber, e os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.2, onde foram colocados para cada tomada os valores máximos e mínimos obtidos.

Tabela 6.2 Intervalos de valores dos adimensionais para os diâmetros ensaiados

Intervalos de adimensionais	$D = 0,075m$	$D = 0,100m$	$D = 0,125m$
<i>F</i>	0,13 - 3,85	0,37 - 2,97	0,52 - 6,39
<i>Rey</i>	$3,02 \times 10^4$ - $2,75 \times 10^5$	$4,10 \times 10^4$ - $3,27 \times 10^5$	$7,50 \times 10^4$ - $7,87 \times 10^5$
<i>Reyr</i>	$1,96 \times 10^4$ - $2,16 \times 10^5$	$1,90 \times 10^4$ - $3,20 \times 10^5$	$4,30 \times 10^4$ - $4,93 \times 10^5$
<i>W</i>	138 - 11449	191 - 12091	585 - 70049
<i>Q (l/s)</i>	1,60 - 14,60	3,0 - 22,0	5,0 - 55

Observando a tabela 6.2 verifica-se que os valores do número de Reynolds radial estão acima dos valores mínimos ($3,0 \times 10^4$) definidos por ANWAR, WELLER E AMPHLET (1978) para não haver influência da viscosidade. Alguns pontos ensaiados ficaram próximos do valor mínimo, porém, esses pontos correspondem a vórtices fracos ou até mesmo pontos onde não apareceram vórtices, e segundo ANWAR (1966), neste caso, o limite para desprezar os efeitos viscosos cai para 10^3 .

O número de Weber também foi calculado, verificando que os pontos experimentais obtidos nos ensaios estão acima do limite definido por JAIN E RAJU (1978) (Weber maior que 120) para que os efeitos da tensão superficial possam ser desprezados. ALDAPE e REINA (1986) estabeleceram que para número de Weber entre 41 e 68 há influência da tensão superficial; porém, não há referência de como este adimensional foi calculado. Pode-se também observar que os valores das vazões são bastante altos, bem maiores do que os citados nos trabalhos existentes citados na revisão bibliográfica.

Para verificar a influência do número de Froude do escoamento na tomada no processo de formação de vórtices, foi feito o gráfico da Figura 6.2 onde se coloca o tipo de vórtice em função do número de Froude. Observa-se que os vórtices mais intensos (com arraste de ar) formam-se em um pequeno intervalo de Froude, que varia de 1,0 a 2,0.

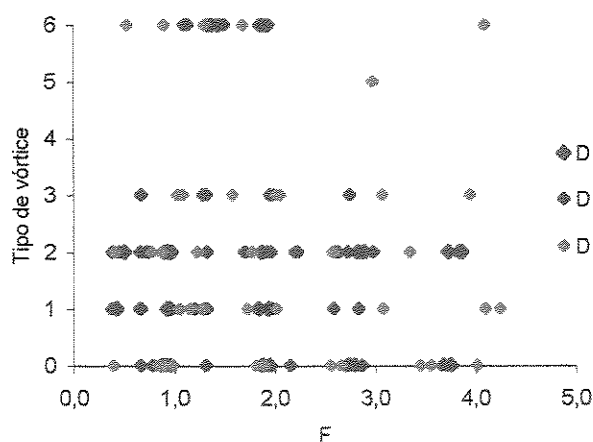


Figura 6.2 Gráfico do tipo de vórtice formado em função do número de Froude

Foi feito também um gráfico de Froude em função do número de Reynolds radial para os diferentes tipos de vórtice, apresentados nas Figuras 6.3.a, 6.3.b e 6.3.c., para as tomadas de 0,075m, 0,100m e 0,125m, respectivamente. Observando as figuras nota-se que para um mesmo número de Froude, a intensidade do vórtice aumenta com o aumento de Reyr, e que a tomada de menor diâmetro menor teve

vórtices menos intensos que a tomada de maior diâmetro.

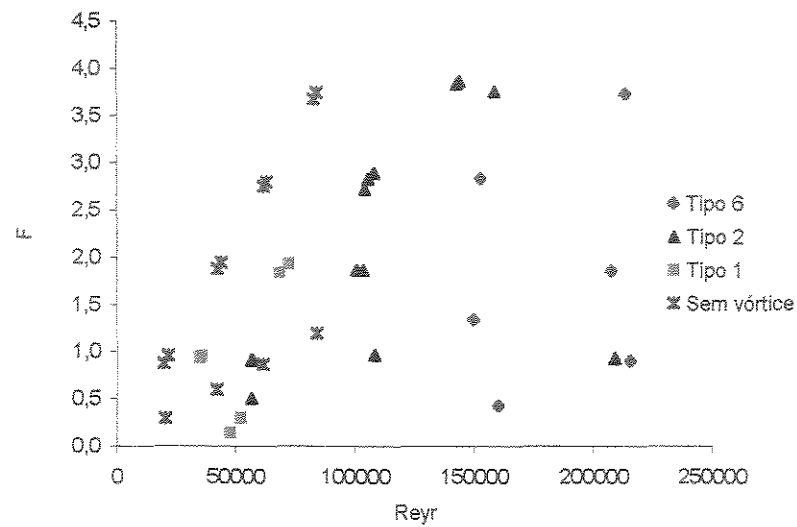


Figura 6.3.a Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para os diferentes tipo de vórtice ($D = 0,075m$).

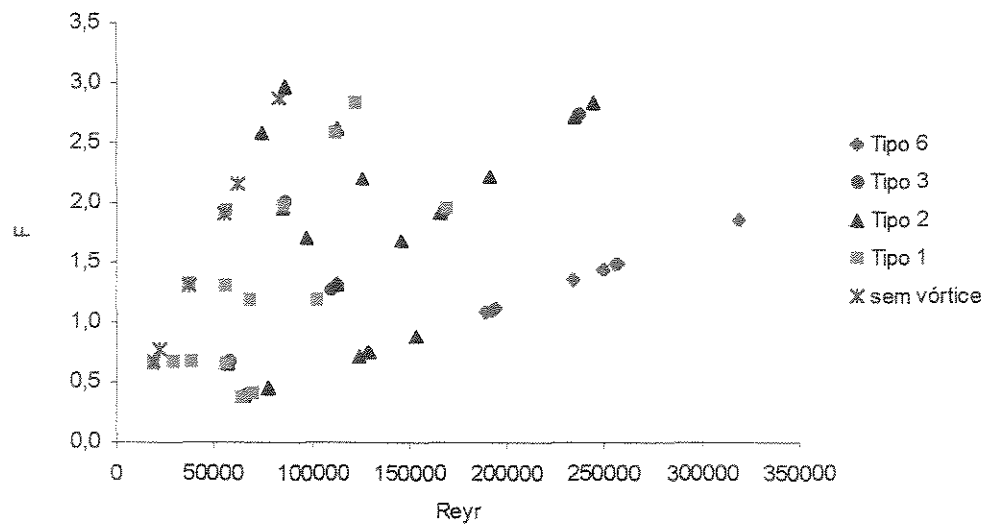


Figura 6.3.b Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para os diferentes tipo de vórtice ($D = 0,100m$).

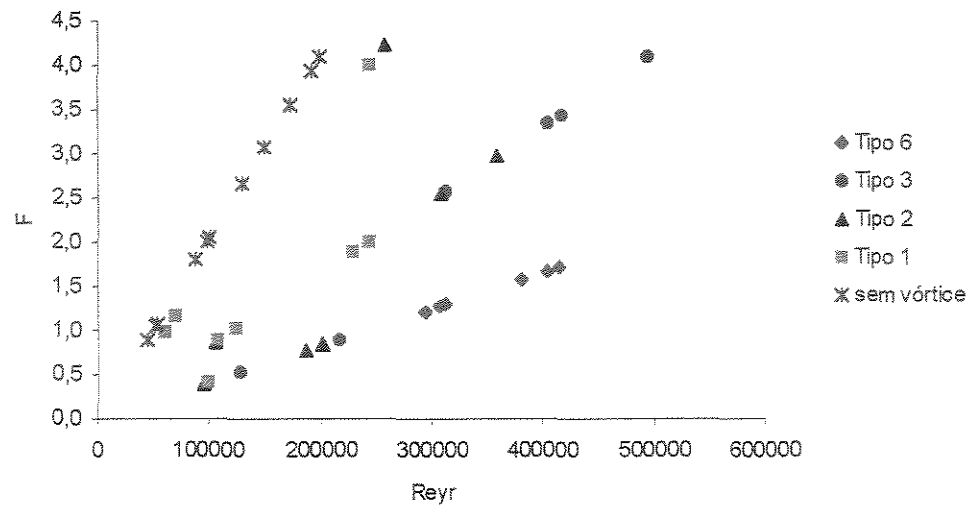


Figura 6.3.c Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para os diferentes tipo de vórtice ($D = 0,125\text{m}$).

6.3 Influência dos parâmetros H/D e número de Reynolds

Um ponto discutido nos trabalhos que dizem respeito à formação de vórtices em tomadas d'água é a influência da relação H/D . Nos gráficos das Figuras 6.4.a, 6.4.b e 6.4.c (tomadas de 0,075m, 0,100m e 0,125m, respectivamente), foram plotados os valores do número de Froude em função do número de Reynolds radial, para cada relação H/D , considerando a formação de vórtices com e sem ar e a não formação de vórtices. Nota-se que, nas três tomadas, a formação de vórtice com arraste de ar e a não formação de vórtice independe da relação H/D , pois se formaram núcleo de ar com diferentes relações H/D , variando 0,5 a 3,0, ou seja, há outros fatores que influem na formação de vórtices, além de H/D . Já para o vórtice sem ar, existe uma pequena influência da relação H/D .

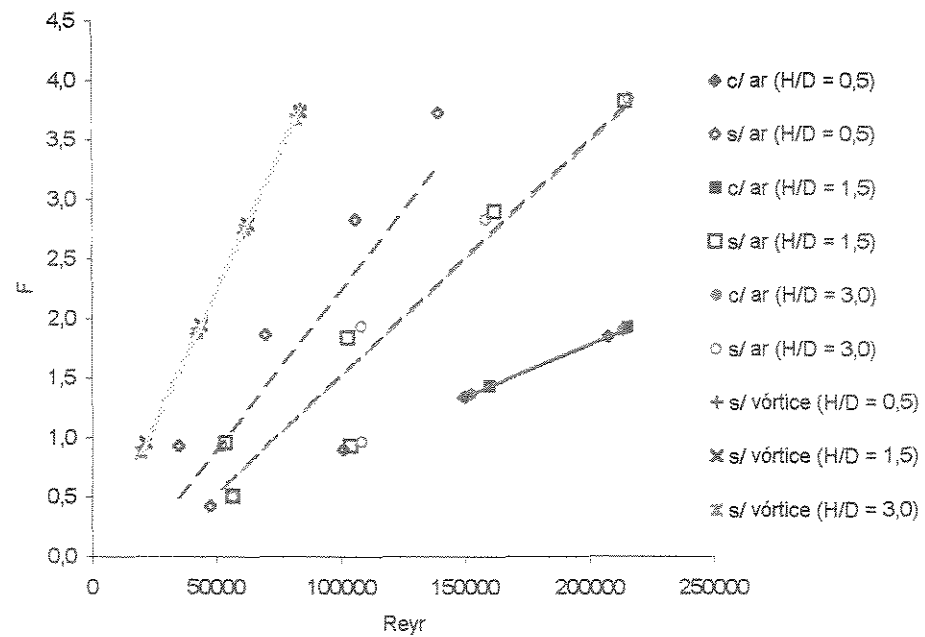


Figura 6.4.a Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial para as diferentes relações H/D , para a tomada de 0,075m.

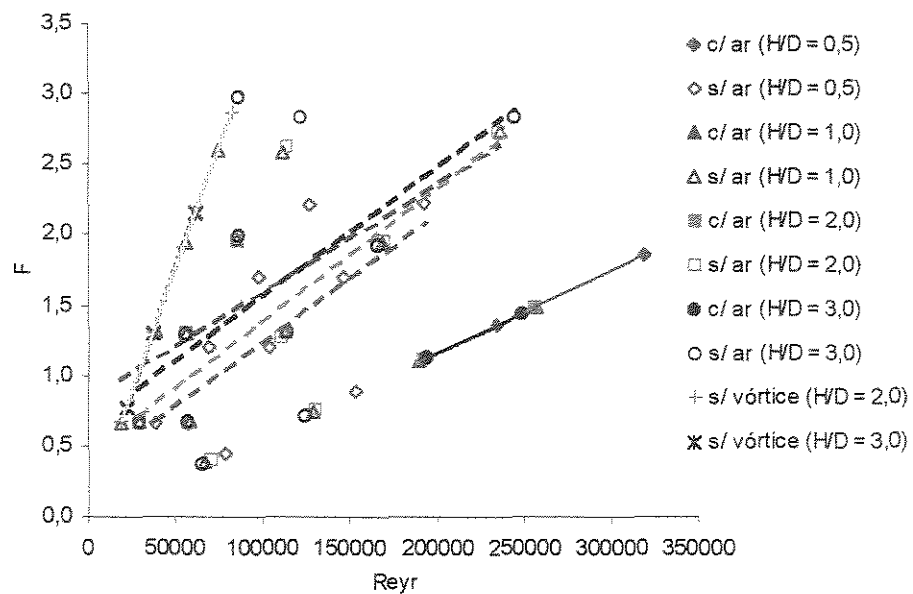


Figura 6.4.b Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial para as diferentes relações H/D , para a tomada de 0,100m.

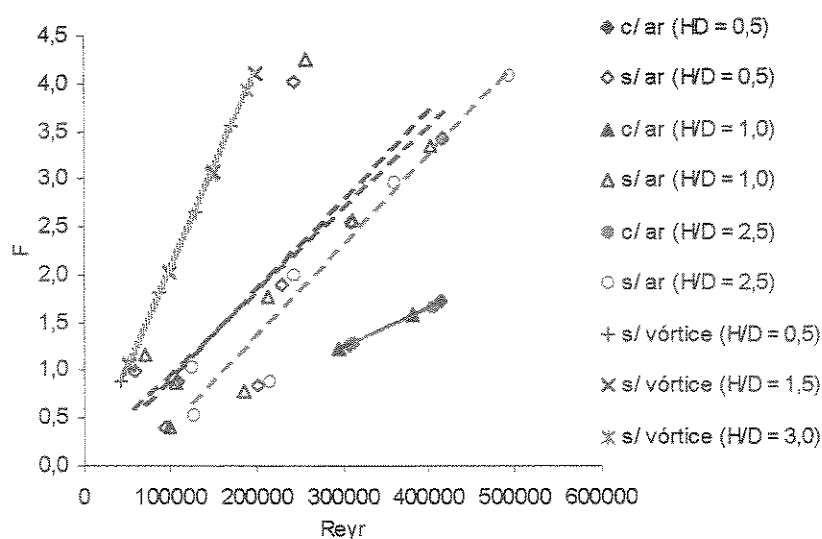


Figura 6.4.c Gráfico do número de Froude em função do número de Reynolds radial e da relação H/D , para a tomada de 0,125m.

Considerando o aparecimento de vórtices com arraste de ar, nota-se, através da Figura 6.5, a influência do número de Reynolds radial. Para as três tomadas ensaiadas neste trabalho e para a situação de aparecimento de vórtice com arraste de ar nas três tomadas, o número de Froude varia de 1,0 a 2,0, já o número de Reynolds radial cresce com o aumento do diâmetro da tomada.

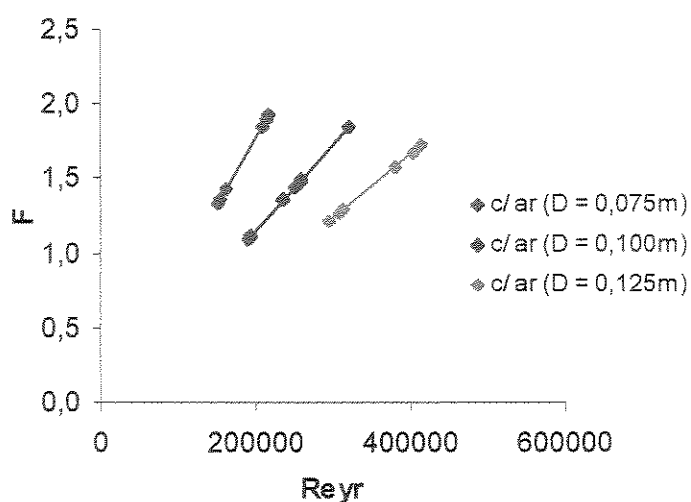


Figura 6.5 Gráfico de F em função de Re_{yr} , considerando a formação de vórtice com arraste de ar nas três tomadas.

Para os casos em há formação de vórtices sem arraste de ar, percebe-se, através do gráfico da Figura 6.6 que as tomadas apresentam praticamente a mesma tendência.

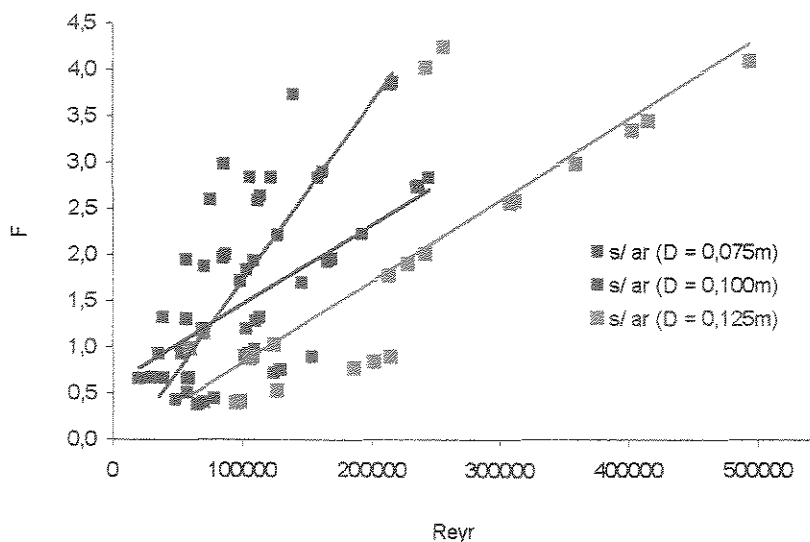


Figura 6.6 Gráfico de F em função de Re_{yr} , considerando a formação de vórtice sem arraste de ar nas três tomadas.

No caso de não haver formação de vórtices, conforme representado pelo gráfico da Figura 6.7, nota-se que, considerando o mesmo intervalo para o número de Froude (que representa a influencia das forças gravitacionais), o comportamento da tomada de 0,125m difere das outras duas. Pode observar-se, portanto, a influencia das forças viscosas representadas pelo número de Reynolds radial. Para o mesmo intervalo de Froude, Reynolds radial variou de 50000 a 200000 para a tomada de 0,125m e de 20000 a 70000 aproximadamente para as tomadas de 0,075m e 0,100m.

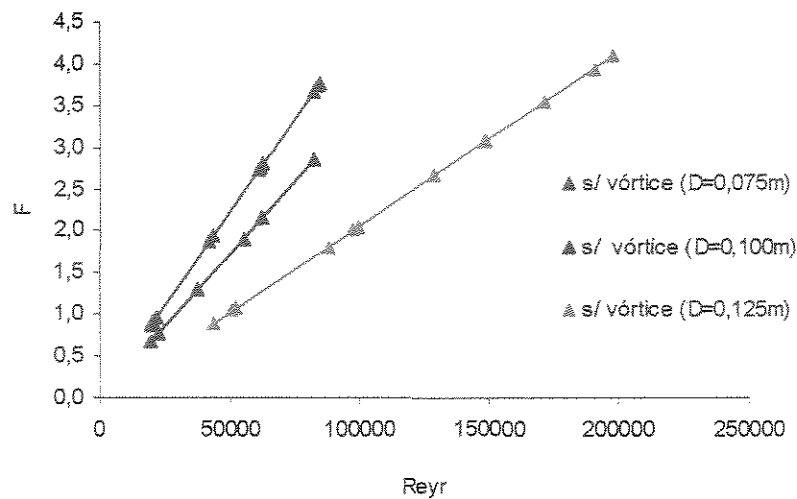


Figura 6.7 Gráfico de F em função de Re_{yr} , considerando o não aparecimento de vórtice nas três tomadas.

6.4 Submergência crítica

Considerando que a relação S/D é um dos fatores que mais influem na formação de vórtice, foram feitos gráficos desta relação em função dos parâmetros importantes na formação de vórtice e estes comparados com os obtidos por outros autores em diversos trabalhos.

Neste trabalho, a submergência crítica foi definida como a altura de água necessária para evitar o aparecimento de vórtice com arraste de ar. Yildirim e Kocabas(1995), Anwar, Weller e Amphlet (1978), Jain e Raju (1978), entre outros, assim a consideram. Porém, muitas vezes, não há uma definição clara do que é a submergência. Assim no trabalho de Denny e Young, citados por Aoki (1982), é difícil saber se a submergência definida é para evitar vórtices com arraste de ar ou qualquer tipo de vórtice. Gulliver, Rindels e Lindblom (1986), relacionando a submergência com o número de Froude, também definiram uma região onde as tomadas estariam livres da formação de vórtices; porém, mais uma vez não há referência sobre qual tipo de vórtice seria evitado nesta região.

Para a análise da influencia deste parâmetro, relacionou-se a submergência

com o diâmetro da tomada e este adimensional com o número de Froude para as diferentes relações H/D nas três tomadas ensaiadas. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 6.8.a, 6.8.b e 6.8.c, para as tomadas de 0,075m, 0,100m e 0,125m, respectivamente. Nota-se que a formação de vórtice com arraste de ar independe da relação H/D . O caso de formação de vórtice com arraste de ar acontece em todas as tomadas, para números de Froude maiores que 1,0 e $S/D = 0,5$.

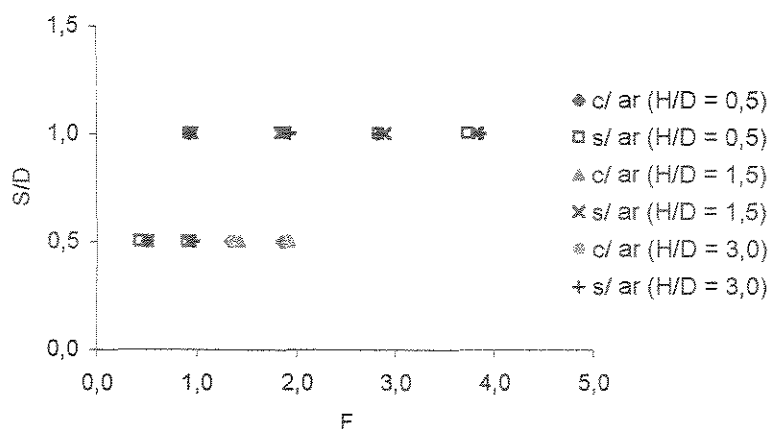


Figura 6.8.a Gráfico de S/D em função de F para a tomada de diâmetro 0,075m.

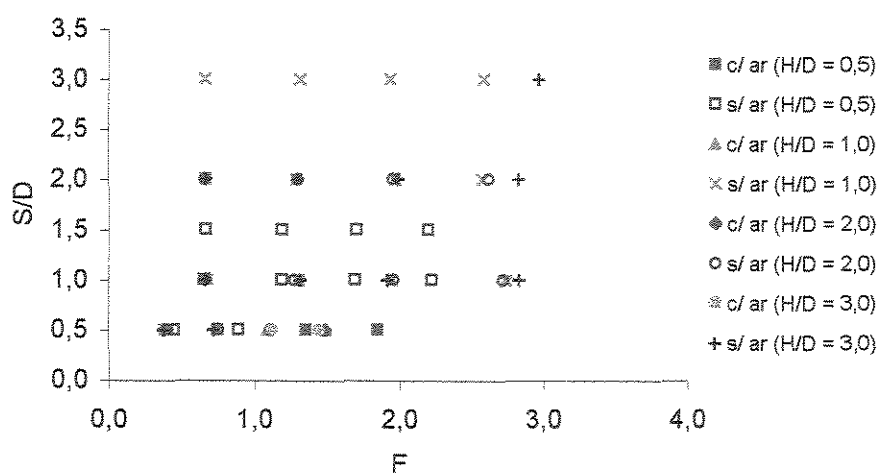


Figura 6.8.b Gráfico de S/D em função de F para a tomada de diâmetro 0,100m.

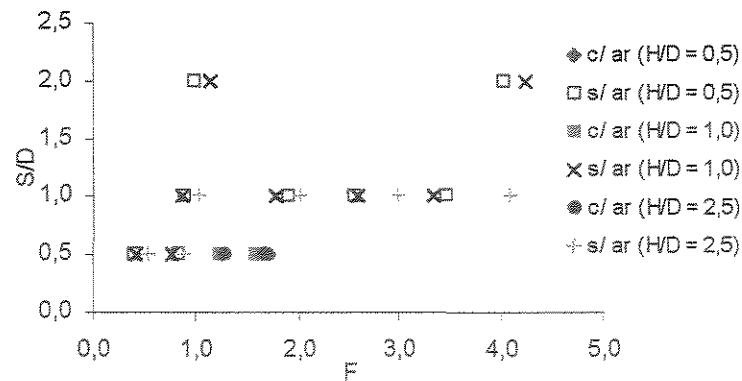


Figura 6.8.c Gráfico de S/D em função de F para a tomada de diâmetro 0,125m

Pôde constatar-se que os valores limites da relação S/D estão próximos dos obtidos por GULLIVER, RINDELS E LINDBLOM (1986) para tomadas horizontais. Na figura 6.9 mostra-se um gráfico com os resultados obtidos neste trabalho plotados junto com os valores de Gulliver, Rindels e Lindblom para tomadas verticais como as aqui estudadas. Pode-se perceber que praticamente todos os pontos, com apenas duas exceções, estão na região onde os vórtices são previstos. Porém, vale ressaltar que Gulliver, Rindels e Lindblom apresentaram a relação S/D em função de F para tomadas horizontais e verticais, sendo que as tomadas horizontais eram de instalações existentes em usinas hidrelétricas (protótipos). Além disso, no trabalho, não há referência ao tipo de vórtice, ou seja, se os vórtices formados são ou não com arraste de ar, apenas são definidas tomadas com ou sem problema de vórtices.

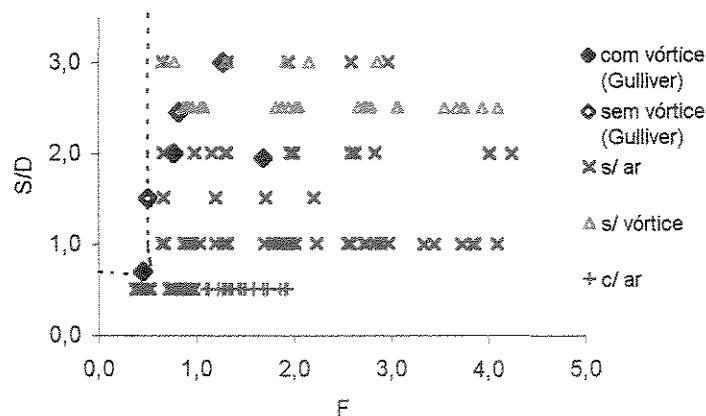


Figura 6.9 Gráfico comparativo de S/D em função do número de Froude.

Pode-se dizer que para não haver formação de vórtices com arrastamento de ar a relação S/D deveria ser maior que 0,5 para tomadas verticais. Para não haver vórtices S/D deveria ser maior que 3,0.

No gráfico da Figura 6.10 estão apresentados os valores da relação S/D em função da velocidade na tomada, V . No mesmo gráfico foi colocada a curva experimental de Denny e Young (1957) citados por AOKI (1982) para tomadas em poços de sucção. A região abaixo da curva indica tomadas com formação de vórtices.

De acordo com os resultados obtidos nas três tomadas ensaiadas, foram propostas curvas para delimitar regiões, em função do tipo de vórtice formado. As curvas delimitam regiões onde há formação de vórtices intensos com arraste de ar tipo 6, e também vórtices do tipo 3, 2 e 1 e uma região onde não há formação de vórtices. Observa-se que a curva de Denny – Young é muito próxima da curva referente aos vórtices do tipo 2 obtidos para as tomadas verticais. Pode ser constatado que muitos pontos representando tomadas com formação de vórtice se localizaram na região onde os vórtices não são previstos de acordo com Denny e Young. Entretanto, esses autores não especificaram que tipo de vórtice foi tomado como referência para se definir a região limite entre formação ou não de vórtices; além disso, os ensaios foram feitos pelos autores era para tomadas de poços de sucção, que tem portanto características diferentes das tomadas ensaiadas neste trabalho.

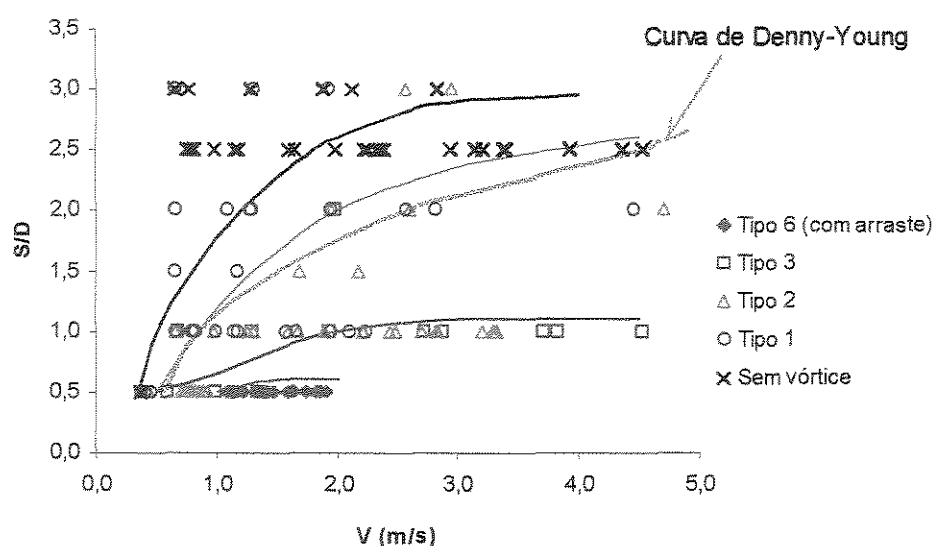


Figura 6.10 Gráfico de S/D em função da velocidade na tomada.

Também resolveu-se verificar a influência da altura total de água no reservatório. Desta forma, designando como x a altura de água considerada a partir do fundo do reservatório, foi feito um gráfico da relação x/D e S/D em função da relação H/D , apresentado na Figura 6.11. Neste caso foram considerados somente os vórtices com arraste de ar. Observa-se que à medida que aumenta a distância entre a tomada e o fundo do reservatório, a submersão necessária para evitar o aparecimento de vórtices com arraste de ar permanece constante, porém, a altura total de água aumenta consideravelmente. DENNY (1956), estudando tomadas para poços de sucção, concluiu que com o aumento da relação H/D , a submersão diminui enquanto a altura total de água aumenta, conforme já foi apresentado Figura 4.5.

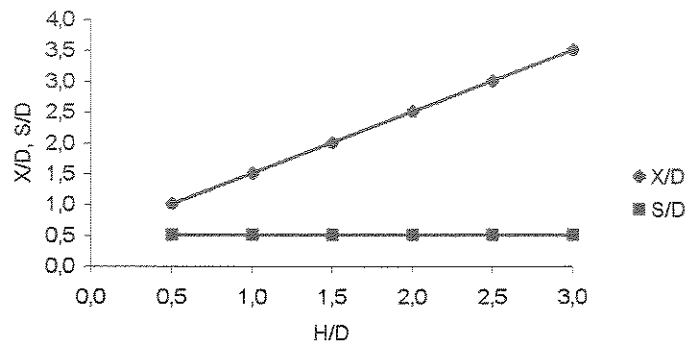


Figura 6.11 Relação entre X/D e S/D em função de H/D

Por outro lado, comparando os dados obtidos neste trabalho experimental com os obtidos por YILDRIM E KOCABAS (1998) para tomadas d'água em reservatórios, foram encontradas diferenças significativas. Em primeiro lugar, os diâmetros utilizados nas tomadas aqui ensaiadas são maiores que os utilizados por eles (0,036 a 0,085m), o que pode ocasionar problemas com relação ao efeito de escala, assim como também aconteceu com o intervalo de vazões. No gráfico da Figura 6.12, são colocados os resultados obtidos por Yildirim e Kocabas junto com os valores experimentais obtidos no presente trabalho.

Nota-se que todos os pontos experimentais estão localizados na região onde os autores previram o arraste de ar. É importante destacar aqui que, possivelmente, há efeito de escala no trabalho de Yildirim e Kocabas, pois, os diâmetros utilizados nos

ensaios realizados pelos autores são bem menores do que os utilizados neste trabalho. Destaca-se também que os referidos autores não indicam valores de referência dos números de Reynolds e Weber, e, por falta de dados, não foi possível o seu cálculo nem a identificação das variáveis para cada configuração ensaiada.

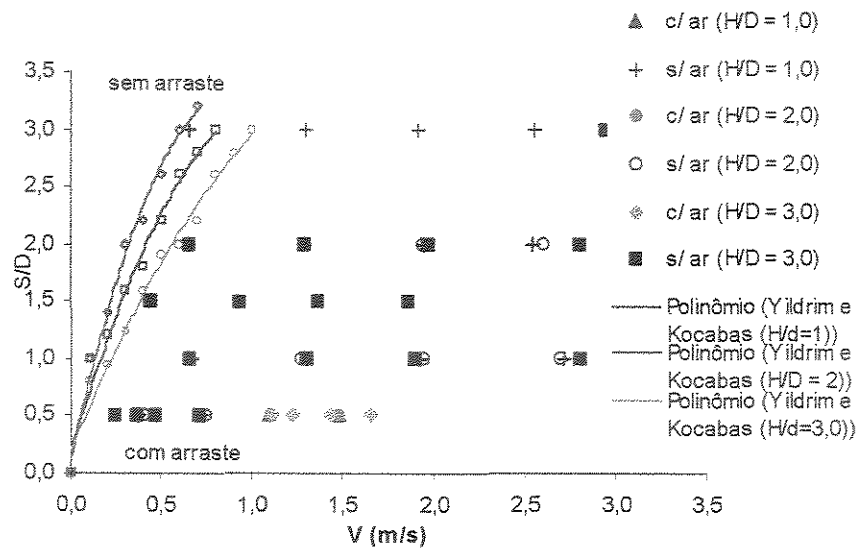


Figura 6.12 Gráfico comparativo dos valores de S/D em função da velocidade na tomada.

6.5 Análise do efeito do ar arrastado pelos vórtices

De acordo com a metodologia apresentada no Capítulo 5, foi medida a vazão de ar arrastada nos casos de formação de vórtice tipo 6. O arraste de ar foi acompanhado de barulho e vibração nas estruturas.

Chamando de β a relação entre a vazão de ar e a vazão líquida, tem-se:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q} \quad (6.1)$$

na qual:

Q_a é a vazão de ar

Q é a vazão líquida

Na tabela 6.3 mostra-se a relação entre as vazões de água e de ar nas tomadas ensaiadas.

Tabela 6.3 Vazões de água e ar nas tomadas ensaiadas.

Tomada	Vazão líquida com arraste de ar (l/s)	Qa (l/s)	β
$D = 0,075m$	7,00	2,20	0,32
	7,27	1,80	0,24
	7,20	2,20	0,31
$D = 0,100m$	14,35	3,10	0,28
	11,56	3,90	0,34
	11,53	3,90	0,34
	11,21	4,70	0,42
$D = 0,125m$	23,30	27,00	1,16
	21,35	27,00	1,26
	22,70	27,00	1,89

Na Tabela 6.3 pode-se observar que a vazão líquida máxima na tomada se reduz à aproximadamente metade quando há arraste de ar.

No gráfico da Figura 6.13 foi colocada a relação β em função do número de Reynolds. Observa-se que o modelo menor arrastou menos ar que o modelo maior.

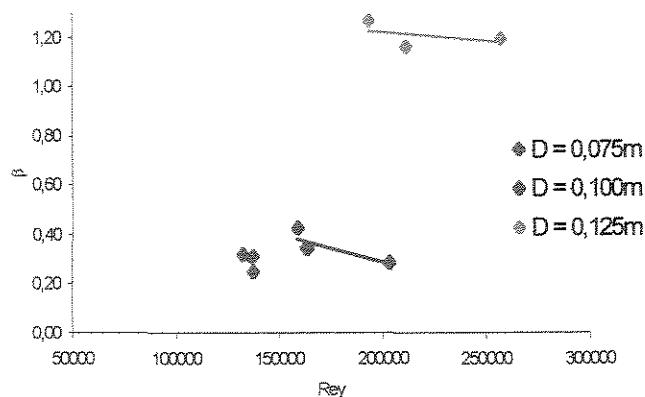


Figura 6.13 Gráfico de β em função do número de Reynolds.

Nos modelos físicos de estruturas hidráulicas, normalmente é utilizado como principal adimensional o número de Froude do escoamento, que é a relação entre as forças de inércia e gravitacionais. Adotando os índices m e p para modelo e protótipo, respectivamente, tem-se as seguintes relações:

$$\lambda = \frac{\lambda_p}{\lambda_m} \quad \text{escala geométrica}$$

$$F_r = \frac{F_p}{F_m} = 1,0 \quad \text{Froude}$$

$$V_r = \frac{V_p}{V_m} = \lambda^{1/2} \quad \text{velocidade}$$

$$K_r = \frac{k_p}{k_m} = \lambda^{-1/6} \quad \text{coeficiente de Strickler}$$

Devido à dependência entre o fator de atrito e Reynolds, é difícil conseguir semelhança adequada entre modelo e protótipo.

Nas tomadas ensaiadas, foi usado o mesmo material (PVC), com a mesma rugosidade equivalente k_s . A altura da rugosidade k_s influi na formação da camada limite e, deste modo, no processo de arrastamento de ar.

As relações entre protótipo e modelo, segundo a semelhança de Froude, são válidas para o escoamento de água pura. As transformações do modelo para o protótipo são sempre feitas com base em dados obtidos para água pura, devendo ser considerada a influência do ar.

A entrada de ar é sempre associada com perdas de energia, que provocam portanto um aumento na profundidade média da água e uma diminuição na velocidade do escoamento. Assim, à medida que o modelo diminui, a velocidade decresce e, conseqüentemente, a vazão de ar diminui.

Como o tamanho das bolhas de ar e a velocidade de ascensão é a mesma em modelo e protótipo, a relação entre essa velocidade e a velocidade do escoamento é

maior no modelo do que no protótipo. Deste modo, as perdas no escoamento do ar são maiores no modelo do que no protótipo. Portanto, do ponto de vista do arraste de ar, existem efeitos de escala.

Para corrigir a vazão de ar arrastada nos modelos, VOLKART (1983) cita valores de coeficientes corretivos obtidos por diversos autores, variando entre 1,05 e 5.

No caso em estudo, deveria obter-se mais dados de arrastamento de ar para poder aplicar algum critério corretivo para as vazões de ar, como já foi feito por GENOVEZ (1991), levando em conta o efeito da rugosidade e os coeficientes corretivos para o ar arrastado. Devido ao problema da rugosidade e, portanto, influência dos efeitos viscosos, a velocidade nos modelos deveria ser aumentada para ter semelhança de escoamentos.

No caso de tomadas d'água de instalações hidrelétricas, a formação de vórtices com arraste de ar provocará uma diminuição da vazão líquida engolida pelas turbinas, e, conseqüentemente, uma diminuição na energia produzida. O gráfico da Figura 6.14 representa uma curva de rendimento de turbinas Francis em função da carga e da vazão. De acordo com a variação da vazão líquida engolida pelas turbinas, pode-se notar que uma redução de 50% na vazão líquida provoca uma perda da eficiência da turbina, chegando a valores de aproximadamente 70%. A redução da potência é de 50% na potência na mesma situação.

Deste modo, constata-se que o problema de formação de vórtices com ar em tomadas d'água de usinas hidrelétricas é prejudicial ao desempenho da instalação, devido à queda de rendimento das máquinas e, além dos efeitos citados, deve-se lembrar o das vibrações nas estruturas.

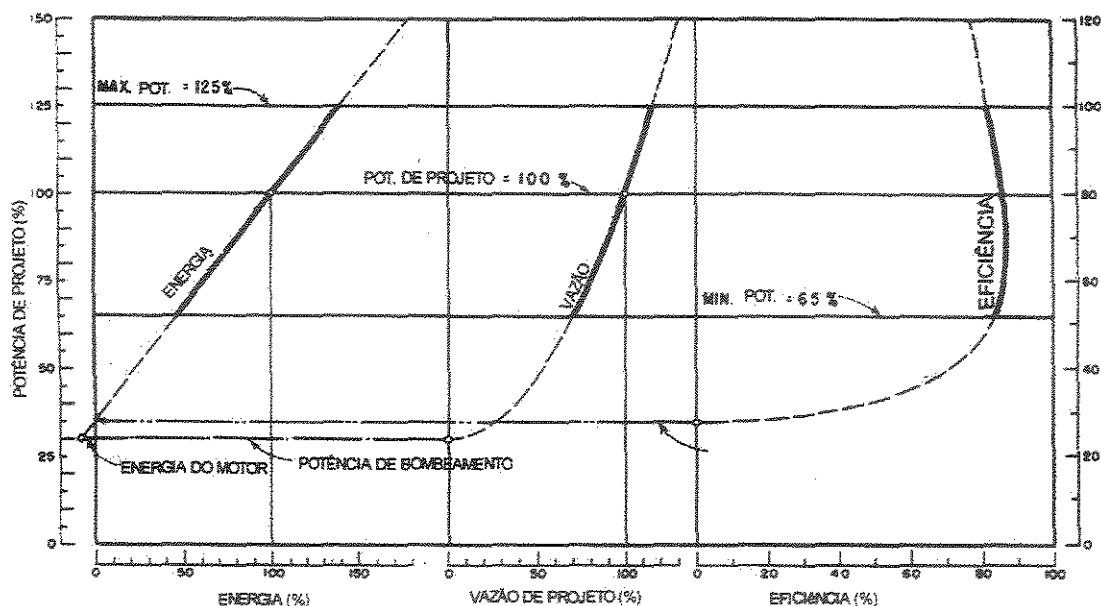


Figura 6.14 Desempenho de uma turbina tipo Francis para velocidade constante, segundo BUREAU OF RECLAMATION (1976).

6.6 Considerações finais

A formação de vórtices em tomadas d'água é um grande problema, principalmente por causar vibração na estrutura, e, quando envolve o arraste de ar, diminui a vazão líquida, prejudicando o desempenho de bombas e turbinas. O arraste de ar pode reduzir consideravelmente a vazão líquida da tomada, reduzindo, conseqüentemente, a energia produzida ou a vazão bombeada.

Um dos principais fatores que influenciam o aparecimento de vórtices é a submergência da tomada, que depende principalmente das condições de aproximação do fluxo e da velocidade na tomada.

Devido à complexidade do fenômeno, torna-se necessário o estudo em modelo para situações particulares do problema em estudo, para, desta forma, determinar as melhores condições para se evitar que ocorram vórtices com arraste de ar. Os modelos devem ser operados com semelhança de Froude, observando os limites acima dos quais os efeitos da viscosidade e tensão superficial possam ser desprezados, evitando assim o efeito de escala na formação de vórtices.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O fenômeno da formação de vórtices em tomadas d'água é ainda bastante estudado e questionado, devido à sua grande complexidade, e representa um aspecto muito importante para o engenheiro, que é a prevenção do aparecimento na fase de projeto da estrutura hidráulica.

Normalmente, para resolver o problema são feitos estudos em modelos os quais são operados segundo a semelhança de Froude. Deve ser verificado o efeito das forças viscosas e de tensão superficial, determinadas pelos valores dos números de Reynolds e Weber. Desta forma, recomenda-se que os valores de Reynolds sejam maiores que 30000 e de Weber acima de 120 para não haver efeitos de escala. No aspecto relativo à formação de vórtice, as tomadas ensaiadas não sofrem efeito de escala em relação às forças de viscosidade e tensão superficial.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho experimental, determinou-se que para não haver formação de vórtices com arraste de ar, deve-se ter uma relação mínima entre a submergência e o diâmetro da tomada de 0,5 e valores de número de Froude maiores que 1,0. Para não haver formação de vórtices, é preciso uma relação entre a submergência e o diâmetro da tomada maior ou igual 3. A relação entre a altura da tomada, referida ao fundo do reservatório, e o diâmetro da tomada tem uma certa importância somente para os casos de vórtices sem arraste de ar, sendo irrelevante quando os vórtices arrastam ar ou quando não aparecem.

Recomenda-se tomar cuidado com a vibração provocada, quando há formação de vórtices, podendo haver danos estruturais.

As conclusões obtidas neste trabalho são válidas dentro do intervalo de medição. Vale ressaltar que as tomadas ensaiadas têm aproximação simétrica, sem influência de estruturas próximas.

Recomenda-se realizar o estudo experimental em um banco de ensaio onde o escoamento possa ser visualizado, utilizando tubulações de acrílico. Assim, poderá se analisar melhor se há somente arraste de bolhas de ar, se há vórtices com pouco arraste ou se o arraste se desenvolve plenamente com formação de núcleo, permitindo, portanto, uma melhor classificação do tipo de vórtice.

Novos estudos deveriam ser feitos, considerando outras condições de aproximação que influenciarão o processo de formação de vórtice. As limitações do banco de ensaio utilizado para a realização deste estudo, não permitiu que tomadas com maiores diâmetros fossem ensaiadas o que permitiria avaliar o efeito de escala no fenômeno de arrastamento de ar.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALDAPE, G. E. , REINA, P. I. R. Efeitos de escala associados a la tensión superficial en la modelación de vórtices. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRAULICA, 17, Guayaquil, Ecuador. México: Editora, 21 al 25 oct 1996. p. 225-233.
2. ANWAR, H. O. Flow in a free vortex. International Water Power and Dam Constructions, p. 153-161, apr., 1965.
3. ANWAR, H. O. Formation of a weak vortex. Journal of Hydraulic Research, vol. 4, n. 1, p. 1-16, 1966.
4. ANWAR, H. O., WELLER, J. A. and AMPHLETT, M. B. Similarity of free-vortex formations at horizontal intake. Journal of Hydraulic Research, Vol. 16, n. 2, p. 95-105, 1978.
5. AOKI, C. M. Condições de semelhança na formação de vórtices em tomadas d'água. Boletim Técnico do DAEE, São Paulo, Vol.5, n.2, p. 129-153, maio/ago 1982.
6. BUREAU OF RECLAMATION. Selecting Hydraulic reaction turbines. Engineering Monograph n. 20. Washington, n.20, 1976.
7. CASAMASSA NETO, J. Vórtice. Dissertação apresentada à EPUSP para obtenção do título de mestre. São Paulo, 1991.

8. CHADWICK, A. e MORFETT, J. Hydraulics in civil and environmental engineering. 3 ed. New York: E & FN Spon, 1999. Cap. 2: Principles of Fluid Mechanics.
9. COMITÊ BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS. Main Brazilian Dams. Design, Construction and performance. 1982.
10. CUOMO, A. R. Introdução ao estudo da semelhança de vórtice nas embocaduras. Boletim Técnico do DAEE, São Paulo, v.4, n.2, maio/ago 1981.
11. DAGGETT, L. L. e KEULEGAN G. H. Similitude in free surface vortex formation. Journal of Hydraulic Division, Vol. 100, n.11, p. 1565– 1581, nov. 1974.
12. DENNY, D. F. An experimental study of air-entraining vortices at pump sumps. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, vol. 170, n. 2, p. 106 - 116, 1956.
13. FALVEY, H. T. Closed conduit flow. Air-Water flow in Hydraulic Structures. Engineering Monograph n. 41, p. 37-80, dec. 1980.
14. FERREIRA, L. M. C, BORIN, D. e GENOVEZ, A. I. B. Submergência Crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais. In: XIX Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II. Cordoba, 22 al 27 oct, 2000. p. 673-680.
15. GENOVEZ, A I.B. Avaliação do efeito de escala em vertedores com emboque tipo tulipa. Tese apresentada à EPUSP para obtenção do título de Doutor. São Paulo, 1991.
16. GENOVEZ, A. I. B. Determinação do comprimento limite no estudo do arrastamento de ar em poço com embocadura tipo tulipa. Tese apresentada

à FEC da UNICAMP para obtenção do título de Livre Docente. Campinas, 1997.

17. GORDON, J. L. Vortex at intake structures. International Water Power & Dam Construction, n.4, p. 137-138, apr. 1970.
18. GULLIVER, J. S. e ARNDT, R. E. A. Hidropower Engineering Handbook. McGraw Hill, 1991. Cap. 5: Hydraulic Conveyance Design.
19. GULLIVER, J. S. , RINDELS, A. J. Weak vortices at vertical intakes. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 113, n.9, p. 1101-1116, sep. 1987.
20. 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, sep. 1986.
21. HECKER, G. E. Model-Prototype comparison on free surface vortices. Journal of the Hydraulic Division, Vol. 107, n.10, p. 1243-1259, oct. 1981.
22. ILYINYKH, I. Hidroelectric Stations. Moscou, MIR Publishers, 1985. Chapter 4: Water intakes, water conduits and diversion structures.
23. JAIN, A. K. e RAJU, K. G. R. Vortex formation at vertical pipe intakes. Journal of Hydraulic Division, Vol. 104, n 10, p. 1429-1445, oct. 1978.
24. LEVI, E. Vortices in hydraulics. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 117, n.4, p.399-413, apr. 1991.
25. MARKLAND, E. e POPE, J. A. Experiments on a small pump suction well, with particular reference to vortex formation. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, London, vol. 170, n. 2, p. 95 – 105, nov., 1955.

26. MARTIM, R. Vórtices em estruturas hidráulicas. Memória n. 594. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1983. P. 3-14.
27. McCORQUODALE, J. A. Scale effects in swirling flow. Journal of the Hydraulic Division, Vol. 94, n.1, p. 285-300, jan. 1968.
28. NEIDERT, S. H., TOZZI, M. J. e OTA, J. J. Vórtices em tomadas de água – Confronto entre resultados de modelos e protótipos. In: IX Simpósio Luso Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos e V Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 10 a 14 de nov, 1991. p. 287-297.
29. PADMANABHAN, M. e HECKER, G. E. Scale effects in pump sump models. Journal of Hydraulic Engineering. Vol. 110, n.11, p.1540-1556, jul. 1983.
30. PIMENTA, C. F. Curso de Hidráulica Geral. Vol.1, 4 ed. Rio de Janeiro: Ed. Guanabara 2, 1981. Cap. 1: Hidrostática.
31. REDDY, Y. R. e PICKFORD, J.A. Vortices at intakes in conventional sumps. International Water Power & Dam Construction, p.108-109, mar. 1972.
32. SHARP, J. J. Hydraulic Modeling. London: Ed. Butterworths, 1981.
33. SINNIGER, R. O. e HAGER, W. H. Traité de Génie Civil. Constructions Hydrauliques. Vol. 15. Ecoulements stationnaires. 1989.
34. VOLKART, P. Air slots for flow aeration. Determination of shape, size and spacing of air slots for the San Roque Dam Spillway. Zurich, Suissa, 1983.
35. YILDIRIM, Nevzat, KOCABAS, Fikret. Critical submergence for intakes in open channel flow. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, n.12, p. 900-905, dec. 1995.

36. YILDIRIM, Nevzat, KOCABAS, Fikret. Critical submergence for intakes in still water reservoir. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 124, n.1, p. 103-104, jan. 1998.
37. ŽAJDILÍK, M. New checking mode of model parameters for vortex formation in pump tanks. International Association for Hydraulic Research, 17th Congress, Baden Baden, Vol. 5, aug., 1977, p.379-386.

FERREIRA, Laura Maria Canno. **Submergência crítica na formação de vórtices em tomadas d'água verticais**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, como requisito para obtenção do título de Mestre. Campinas, 2001.

ABSTRACT

In the intakes design, the hydraulic engineering come across a great difficult: the prevention of vortex formation. The drainage with vorticity can carry away harmful consequences, such as: hydraulic machines falling efficiency, flow decrease and vibration. Critical submergence is one of the parameters that most contribute to the occurrence of vortex formation. This parameter depends on the diameter used at the intake, on the drainage approximation angle, on the structures dimensions that must be near the intake, on the Froude, Reynolds and Weber number. This paper care fore the studies to establish generic criterions avoid vortex formation at vertical intakes. An experimental study were carry out, using intakes with different diameters, varying the intake height, submergence and flow. It was noticed the influence of the water approximation height regarding the intake diameter. To relations between the submergence and the intake diameter greater than 0,5 there were no vortex with air entrainment formation. Left from this limit, the vortex were with no air entrainment. TO avoid any intensity vortex, the relation should be greater than 3,0.

Key words: vortex, critical submergence, vertical intakes, experimental study.