IVAN JUNCIONI DE ARAUZ

**VERTEDOR DE SUPERFÍCIE E ESCOAMENTO SOB
COMPORTAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

São Paulo

2005

IVAN JUNCIONI DE ARAUZ

**VERTEDOR DE SUPERFÍCIE E ESCOAMENTO SOB
COMPORTAS**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Área de Concentração:
Engenharia Hidráulica

Orientador:
Prof. Dr.
Kikuo Tamada

São Paulo
2005

FICHA CATALOGRÁFICA

Arauz, Ivan Juncioni de

Vertedor de Superfície e Escoamento sob Comportas / I.J. de Arauz. -- São Paulo, 2005.
134p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária

1.Hidráulica Fluvial 2. Vertedores 3. Escoamento 4. Comportas
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. II.t.

ERRATA

PÁGINA	LINHA	ONDE SE LÊ	LEIA-SE
3	25 ^a	infinitude	grande quantidade
4	18 ^a	num menor comprimento	numa menor largura
29	9 ^a	O perfil lemniscata apresenta dois pontos de curvatura não contínuos: o primeiro na junção com o paramento de montante e o outro na concordância com um elemento geométrico à jusante, região onde o escoamento é supercrítico $Fr > 1$ e não mais influência no coeficiente de vazão.	O perfil lemniscata apresenta um ponto de curvatura não contínuo na junção com o paramento de montante.
32	2 ^a	A medida que	À medida que
45	Legenda da figura 2.24	Fig. 2.24 - Efeito da forma do pilar sobre o coeficiente de contração K_p	Fig. 2.24 - Efeito da forma do pilar sobre o coeficiente de contração K_p (WES, 1988)
46	Legenda da figura 2.25	Fig. 2.25 - Efeito do comprimento do pilar sobre o coeficiente de contração K_p	Fig. 2.25 - Efeito do comprimento do pilar sobre o coeficiente de contração K_p (WES, 1988)
47	Legenda da figura 2.26	Fig. 2.26 - Efeito da altura do vertedor sobre o coeficiente de contração K_p	Fig. 2.26 - Efeito da altura do vertedor sobre o coeficiente de contração K_p (Chow, 1959)
49	Eq. 3.1	$H_e = y_1 + \frac{Q^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{Q^2}{2gy_2^2}$	$H_e = y_1 + \frac{q^2}{2gy_1^2} = y_2 + \frac{q^2}{2gy_2^2}$
65	8 ^a	A Fig. 3.14	A Fig. 3.16
79	7 ^a	as causas de vorticidade são causadas	a vorticidade é causada

*Aos meus pais Inez e Aramis, pelo
apoio e incentivo constantes no meu
desenvolvimento profissional.*

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Kikuo Tamada pela orientação e pela oportunidade de aprendizado no Laboratório de Hidráulica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Ao Prof Dr. Podalyro Amaral de Souza por todos os conhecimentos positivos proporcionados para o meu aprendizado e para a elaboração desta dissertação.

Ao Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH (Convênio entre a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Departamento de Águas e Energia Elétrica), pelo apoio e por colocar a disposição recursos humanos necessários à elaboração deste trabalho.

A equipe do setor de mecânica, acrílico e marcenaria do CTH que ajudaram durante a construção e operação do modelo reduzido.

Aos colegas e funcionários do CTH pela contribuição decisiva mostrada em todos os momentos.

A todos que, direta ou indiretamente, colaboraram na execução deste trabalho.

RESUMO

Os vertedores são estruturas hidráulicas construídas para controlar o nível d'água do reservatório, permitindo a passagem das vazões escoadas com a máxima eficiência possível sem provocar problemas à estrutura. Para atingir este objetivo, as condições de aproximação do escoamento à estrutura e a forma geométrica do perfil vertente são muito importantes. O controle da soleira por comportas provoca uma mudança significativa nas condições de escoamento sobre o perfil vertente. O posicionamento e a forma da comporta tem forte influência no comportamento do coeficiente de vazão e nas pressões sobre a soleira. A formação de vórtice é um fenômeno indesejável que pode ocorrer quando a operação da comporta é parcial, prejudicando a capacidade de vazão e provocando vibrações na estrutura. Este trabalho apresenta uma abordagem teórica sobre o assunto vertedor de superfície e escoamento sob comportas, apresentando resultados de diferentes estudos para melhor compreensão do funcionamento do vertedor.

ABSTRACT

Spillways are hydraulic structures constructed to control the water level of the reservoir, allowing the overflows with the maximum possible efficiency without provoking problems to the structure. The approach flow pattern to the structure and the geometric form of the spillway profile are basic importance. The control of the spillway by the floodgates modifies the draining conditions. The positioning and the form of the gate have strong influence in the behavior of the discharge coefficient and the pressures on the surface profile. A vortex formation is an undesirable phenomenon that it can occur when the operation of the floodgate is partial, reducing the discharge coefficient and produce vibrations in structure. This work presents a theoretical approach about flow over spillway and under of the partial opening of the floodgate, presenting results of different studies for better understanding the function of the spillway.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Motivação do Trabalho	5
1.2. Objetivo do Trabalho	6
1.3. Ordenação do Trabalho	6
2. VERTEDORES DE SOLEIRA LIVRE.....	8
2.1. Vertedor Retangular de Parede Delgada	8
2.2. Coeficiente de Vazão de Vertedor Retangular de Parede Delgada.....	10
2.3. Formas do Perfil Vertente	13
2.3.1 <i>Perfis do Tipo Creager e Scimemi</i>	13
2.3.2 <i>Perfis do tipo USBR e WES</i>	17
2.3.3 <i>Perfil com Forma Geométrica de Elipse na Região a Montante da Crista</i>	26
2.3.4 <i>Perfil Lemniscata</i>	29
2.4. Recuo do Paramento de Montante	31
2.5. Coeficiente de Vazão de Vertedor Soleira Normal.....	32
2.5.1 <i>Efeito da Altura do Vertedor</i>	32
2.5.2 <i>Efeito de Cargas Diferentes da Carga de Projeto</i>	33
2.5.3 <i>Efeito da Inclinação do Paramento de Montante</i>	37
2.5.4 <i>Efeito da Posição dos Níveis d'água a Jusante</i>	37
2.5.5 <i>Efeito da Presença de Muros e Pilares</i>	40
3. ESCOAMENTO SOB COMPORTAS.....	48
3.1. Coeficiente de Vazão para escoamento sob comporta	48
3.1.1 <i>Influência do Número de Reynolds</i>	51
3.1.2 <i>Orifícios de Grandes Dimensões</i>	52
3.1.3 <i>Efeito da Inclinação do Paramento da comporta em relação ao fundo</i>	54
3.1.4 <i>Efeito da forma e dimensões da comporta</i>	64
3.2. Pressões na soleira do vertedor.....	67

4. ESTUDO SOBRE VÓRTICES.....	73
4.1. Modelo Simples de Vórtices	74
4.1.1 Vórtice Forçado	74
4.1.2 Vórtice Livre.....	75
4.1.3 Vórtice Combinado de Rankine.....	77
4.2. Causas da Vorticidade.....	78
4.3. Comparação Modelo-Protótipo.....	80
4.4. Classificação dos Vórtices	86
4.5. Proteção Contra a Formação de Vórtices.....	90
5. O MODELO FÍSICO.....	92
5.1. Considerações Iniciais.....	92
5.2. Descrição do Modelo Físico.....	92
5.3. Procedimentos Experimentais.....	94
5.4. Resultados Experimentais	99
6. CONCLUSÕES	103
ANEXO	108
LISTA DE REFERÊNCIAS	114

LISTA DE FIGURAS

Fig. 2.1 - Lançamento de projétil e escoamento sobre a crista de um vertedor retangular de soleira delgada (Chow, 1959)	8
Fig. 2.2 - Escoamento sobre um vertedor retangular de parede delgada (Porto, 1988)	10
Fig. 2.3 - Perfil proposto por Creager (Creager e Justin , 1950).....	14
Fig. 2.4 - Perfil Scimemi, Creager e lâmina livre (Pimenta, 1977).....	15
Fig. 2.5 - Elementos geométricos do perfil do vertedor proposto por USBR (1966)	17
Fig. 2.6 - Gráfico para a determinação dos parâmetros K e n da equação do perfil do vertedor proposto por USBR (1966)	18
Fig. 2.7 - Gráfico para a determinação dos parâmetros geométricos R_1 , R_2 , y_c e x_c da região entre a crista e o paramento de montante do vertedor (USBR, 1966)	19
Fig. 2.8 - Perfis WES com paramento de montante inclinado	22
Fig. 2.9 - Distribuição de pressões para perfil USBR com paramento de montante vertical antes e depois da adoção do raio de $0,04 H_d$. (Maynord, 1985)...	23
Fig. 2.10 - Concordância da região a montante da crista do vertedor (WES, 1988). 24	
Fig. 2.11 - Distribuição de pressões para perfis do tipo WES com paramento de montante inclinado (Lemos, 1981)	26
Fig. 2.12 - Concordância em forma geométrica de elipse entre a crista e o paramento de montante (Maynord, 1985).....	28
Fig. 2.13 - Distribuição de pressões para o perfil estudado por Maynord (1985) para $P/H_d=1$, paramento de montante inclinado 1V:1H e sem pilares sobre a soleira	28
Fig. 2.14 - Perfil lemniscata baseado no perfil Creager estudado por Kanashiro (1989).....	30
Fig. 2.15 - Vertedor com recuo no paramento de montante (WES, 1988)	32
Fig. 2.16 - Coeficiente de vazão do vertedor em função da relação P/H_d (P =profundidade do vertedor e H_d = carga de projeto) USBR (1966)	33

Fig. 2.17 - Coeficiente de vazão do vertedor para carga de operação diferente da carga de projeto (C_o' - coeficiente de vazão para a carga de operação) (Chow, 1959)	34
Fig. 2.18 - Coeficiente de vazão em função de P/H_d e H_e/H_d para vertedor com forma geométrica de elipse a montante da crista e paramento de montante vertical (Maynord, 1985)	36
Fig. 2.19 - Relação de $C_{d \text{ inclinado}}/C_{d \text{ vertical}}$ em função da profundidade relativa de aproximação P/H_d (USBR, 1966)	37
Fig. 2.20 - Redução do coeficiente de vazão para crista afogada a jusante (WES, 1988 e Lencastre, 1983)	39
Fig. 2.21 - Comportamento da pressão sobre a soleira (linhas tracejadas) e da linha d'água (linhas contínuas) para crista afogada a jusante (Chow, 1959).....	40
Fig. 2.22 - Coeficiente de contração lateral K_a para barragens com seção adjacente de concreto em função da relação H_e / R_a (R_a = raio do muro de aproximação) (WES, 1988).....	42
Fig. 2.23 - Coeficiente de contração lateral K_a para barragens com fechamento em talude de terra em função da relação H_e / H_d (WES, 1988)	43
Fig. 2.24 - Efeito da forma do pilar sobre o coeficiente de contração K_p	45
Fig. 2.25 - Efeito do comprimento do pilar sobre o coeficiente de contração K_p	46
Fig. 2.26 - Efeito da altura do vertedor sobre o coeficiente de contração K_p	47
Fig. 3.1 - Comporta plana vertical (Porto, 1998)	49
Fig. 3.2 - Variação dos coeficientes C_d , C_v , e C_c de um orifício circular com o número de Reynolds (Pimenta, 1977).....	51
Fig. 3.3 - Coeficiente de vazão C_d em função da relação a/H_1 (USBR, 1966)	53
Fig. 3.4 – Representação esquemática de uma comporta plana inclinada sobre o fundo plano (Nago, 1983)	54
Fig. 3.5 - Coeficiente de contração em função do ângulo de inclinação da comporta e da relação a/H segundo Nago (1983)	55
Fig. 3.6 - Coeficiente de vazão em função do ângulo de inclinação da comporta plana e da relação a/H (Nago 1983).....	56
Fig. 3.7 - Comporta radial sobre um fundo plano (Pinto, 1992).....	57
Fig. 3.8 - Hipótese proposta por Koch (Pinto, 1992).....	58

Fig. 3.9 - Hipótese proposta por Pinto (1992).....	58
Fig. 3.10 - Comporta radial sobre um perfil soleira normal (Pinto, 1992)	59
Fig. 3.11 - Coeficiente de vazão em função do número de Froude obtidos por Gentilini para comporta plana, segundo Cozzo (Pinto, 1992)	60
Fig. 3.12 - Coeficiente de vazão em função do número de Froude obtidos por Gentilini para comporta radial, segundo Cozzo (Pinto, 1992).....	60
Fig. 3.13 - Coeficiente de vazão para vertedor perfil normal controlado por comporta radial (WES, 1988).....	63
Fig. 3.14 - Comporta com fundo inclinado (Nago, 1983).....	64
Fig. 3.15 - Coeficiente de vazão para $\beta=45^\circ$, comporta com fundo inclinado (Nago, 1983)	65
Fig. 3.16 - Comporta inclinada com extensão vertical (Nago, 1983)	66
Fig. 3.17 - Coeficiente de vazão para $\beta=45^\circ$, comporta com extensão vertical (Nago, 1983)	66
Fig. 3.18 - Modelo de comporta plana estudada pelo WES (Rouse, 1949)	67
Fig. 3.19 - Região do perfil sujeito a ocorrência de pressão negativa para abertura parcial de comporta (USBR, 1966).....	69
Fig. 3.20 – Instalação experimental (Lemos, 1975).....	70
Fig. 3.21 - Definição dos parâmetros adimensionais para comportas radiais (Lemos, 1975)	71
Fig. 3.22 – Distribuição de pressões ao longo do perfil do vertedor com paramento de montante vertical, para a posição do batente da comporta localizado a montante da crista em $A/H_d = -0,1$ (Lemos, 1981)	71
Fig. 3.23 - Distribuição de pressões ao longo do perfil do vertedor com paramento de montante vertical, para a posição do batente da comporta localizado a jusante da crista em $A/H_d = 0,2$ (Lemos, 1981)	72
Fig. 4.1 - Vórtice forçado (Aoki, 1986)	75
Fig. 4.2 - Vórtice livre (Durgin e Hecker, 1978)	76
Fig. 4.3 - Vórtice combinado de Rankine (Aoki, 1986).....	77
Fig. 4.4 - Mecanismo de formação do tornado (Levi, 1972)	78
Fig. 4.5 - Fontes de vorticidade segundo Durgin e Hecker (1978)	79
Fig. 4.6 - Fonte de vorticidade em razão da presença de massa d'água imóvel	80

Fig. 4.7 - Instalação experimental para o estudo de vórtices (Anwar et al., 1978)...	82
Fig. 4.8 - Variação do Parâmetro de circulação $\Gamma D/Q$ em função do número de Reynolds. (Anwar et al., 1978)	83
Fig. 4.9 - Variação do Parâmetro de circulação $\Gamma D/Q$ em função do número de Weber (Anwar et al., 1978).....	85
Fig. 4.10 - Representação esquemática dos tipos de vórtice (Aoki, 1986)	87
Fig. 4.11 - Classificação do tipo de vórtice em relação à profundidade relativa e do número de Froude (Durgin e Hecker, 1978)	88
Fig. 4.12 - Registro contínuo dos tipos de vórtice	89
Fig. 4.13 - Dispositivos antivórtice propostos por Denny e Young apud Aoki (1986)	91
Fig. 5.1 - Delimitação do modelo reduzido.....	93
Fig. 5.2 - Forma geométrica do perfil do vertedor.....	93
Fig. 5.3 - Pontos de medição de pressão	95
Fig. 5.4 - Forma geométrica dos muros de aproximação.....	96
Fig. 5.5 - Configuração da região de aproximação ao vertedor com a presença de espigão junto às margens	97
Fig. 5.6 - Desenho esquemático indicando a mudança do eixo das comportas e o posicionamento das estruturas antivórtice	98
Fig. 5.7 - Distribuição de pressões ao longo do vertedor.....	100

LISTA DE TABELAS

Tab. 2.1 - Valores de K e n para a determinação dos perfis WES	20
Tab. 4.1 - Classificação dos tipos de vórtice.....	86
Tab. 5.1 - Resultados experimentais de medições de pressões na soleira do vertedor	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

HDC - Hydraulic Design Criteria

USBR - United States Department of the Interior Bureau of Reclamation

WES - Waterways Experiment Station

LISTA DE SÍMBOLOS

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
a	abertura da comporta
A	distância horizontal entre a crista e o ponto de batente no perfil
A_c	área da seção transversal do conduto
A_e	semi-eixo maior da elipse
a_m	raio vetor máximo da lemniscata
A_o	área do orifício
a_v	raio vetor da lemniscata
a_v	distância que delimita a região do vórtice forçado
B	altura da comporta
b	distância vertical entre o piso do tanque ao eixo da embocadura
B_e	semi-eixo menor da elipse
C	constante
C_c	coeficiente de contração
C_d	coeficiente de vazão
C_o	coeficiente de vazão
C_p	coeficiente de vazão para carga de projeto
C_v	coeficiente de velocidade
d	altura d'água a jusante
D	diâmetro do conduto
d_c	espessura da comporta
E	espessura da lâmina d'água
Fr	número de Froude
g	aceleração da gravidade
H	carga disponível a montante
h	profundidade
h	profundidade a montante
h_∞	profundidade no reservatório numa região não perturbada
H_1	carga sobre o bordo inferior da comporta

SÍMBOLO**DEFINIÇÃO**

H_2	carga sobre o bordo superior da comporta
H_a	carga correspondente a velocidade de aproximação
h_d	diferença de nível entre a superfície livre a montante e a jusante
h_d	distância vertical entre o nível d'água de montante e jusante
H_d	carga de projeto
H_e	carga total de operação
h_o	distância do fundo do reservatório à superfície livre no eixo do vórtice
K	parâmetro dependente da inclinação do paramento de montante
K_a	coeficiente de contração lateral
K_c	constante
K_p	coeficiente de contração do pilar
l	altura da extensão do lábio da comporta
L	largura do vão ou do vertedor
L_e	largura efetiva da crista
L_o	largura real da crista
m	distância entre ponto de abertura efetiva no perfil e o ponto-foco
M_r	distância vertical entre o ponto de início do recuo e o ponto mais elevado do paramento de montante
N	número de pilares
n	parâmetro dependente da inclinação do paramento de montante
N_r	distância horizontal do recuo do paramento de montante
P	altura do vertedor
p	pressão
q	vazão específica
r	distância radial de referência;
R	raio do perfil do vertedor a montante da crista
R_a	raio do muro de aproximação
R_c	raio da comporta
Re	número de Reynolds
R_f	raio do vórtice forçado

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
s	submergência
t	variável tempo
V	velocidade média na seção
V_i	velocidade inicial de lançamento
v_{mt}	velocidade média tangencial
V_t	velocidade tangencial
We	número de Weber
w	variável linear ao longo da abertura efetiva
x	abscissa, origem na crista
x_o	abscissa com origem no centro do orifício
y	ordenada, origem na crista
y_1	altura d'água na seção 1
y_2	altura d'água na seção 2
y_o	ordenada com origem no centro do orifício
z	profundidade do vórtice
z_r	distância entre o plano de referência e o fundo do canal
Γ	circulação
ν	coeficiente de viscosidade cinemática
ρ	massa específica do fluido
σ	tensão superficial do fluido
β	ângulo da comporta em relação ao fundo
γ_i	ângulo de inclinação do fundo
γ	peso específico
φ	ângulo de lançamento
ρ_v	raio vetor
α	ângulo entre a tangente ao lábio da comporta e a vertical
α_o	ângulo entre a tangente a lemniscata na origem e o raio vetor máximo
α_i	ângulo que o raio vetor faz com a_m
θ	ângulo que a tangente ao perfil lemniscata faz com a horizontal

SÍMBOLO**DEFINIÇÃO**

θ_c	ângulo formado entre o fundo do canal e a projeção da comporta plana
ω	velocidade angular
ξ	ângulo entre seção do orifício e a vertical

1. INTRODUÇÃO

Na concepção de uma obra hidráulica cujo objetivo seja o armazenamento de água para a geração de energia, abastecimento de água, proteção contra inundações, irrigação, navegação, recreação e etc, geralmente é necessária a presença de um extravasor.

O extravasor é um órgão constituído de diferentes partes com o objetivo de permitir a passagem da água em excesso no reservatório para jusante.

A escolha de um conjunto extravasor depende do local onde será implantado, podendo apresentar inúmeras alterações para as diferentes partes que compõem o conjunto para uma mesma obra, devendo ser escolhido para cada caso, o conjunto mais adequado sob o ponto de vista hidráulico e econômico.

Os principais aspectos que devem ser observados para definir a escolha do extravasor são:

- Tipo de obra
- A localização da obra
- As características topográficas e geológicas do local
- A vazão específica de projeto
- O desnível
- Níveis d'água de montante e jusante

A melhor escolha de um extravasor, sobre o ponto de vista hidráulico, é aquela que implique elevado coeficiente de vazão (eficiência) e produza a restituição do escoamento ao leito natural do rio de forma semelhante às condições naturais anteriores à implantação da obra e de maneira a não colocar em risco a sua estabilidade.

O extravasor é um órgão constituído pelas seguintes partes:

- Canal de aproximação
- Estrutura de controle
- Estrutura de descarga
- Estrutura de dissipação de energia
- Canal de restituição

De forma geral podemos definir assim os diferentes componentes do extravasor:

- Canal de aproximação

O canal de aproximação é responsável por captar a água do reservatório e encaminhá-la à estrutura de controle. O canal de aproximação existe quando a estrutura vertente (vertedor) está posicionada junto às margens, sendo necessária a sua construção. A velocidade, profundidade e a forma geométrica do canal junto à estrutura de controle são fatores que podem provocar perda de carga e distribuição irregular do escoamento influenciando na vazão descarregada e nas condições de escoamento junto à estrutura.

- Estrutura de controle

É o principal componente do vertedor porque regula a descarga do reservatório, mantendo os níveis d'água nas cotas predeterminadas em projeto. A descarga pode ser controlada por comportas ou não. A estrutura de controle pode ser uma crista, um orifício ou um bocal. Conforme foi mencionado acima, as condições de aproximação do escoamento à estrutura são fundamentais para a eficiência da estrutura de controle.

- Estrutura de descarga

O canal de descarga é responsável por conduzir o escoamento da estrutura de controle até o dissipador de energia. Há casos em que não existe a estrutura de descarga como em barragens em arco, quando se faz o lançamento do jato através de orifícios. A estrutura de descarga pode ter diferentes formas: pode ser um paramento

inclinado com perfil adequado, denominado na prática com o nome de *rápido*, um canal escavado ou um canal coberto debaixo da barragem.

- Estrutura de dissipação de energia

Quando a água passa pela estrutura de descarga e chega ao nível de jusante a energia potencial se transforma em energia cinética (velocidade). Para evitar erosões no leito de jusante e no pé da barragem é necessário executar uma estrutura para dissipar a energia, restituindo o escoamento com velocidade compatível com o leito a jusante.

- Canal de restituição

O canal de restituição tem por objetivo conduzir o escoamento proveniente da estrutura de dissipação de energia para o leito do rio. Ainda que seja construída a estrutura de dissipação, a velocidade do escoamento normalmente é elevada, portanto, é conveniente proteger o canal.

Um dos componentes mais importantes de um extravasor é a estrutura de controle que tem por finalidade, além de controlar a vazão, permitir a transposição do escoamento de maneira eficiente sem provocar danos à estrutura da barragem. A característica mais importante da eficiência da estrutura de controle ou vertedor é o chamado coeficiente de vazão, porque quanto maior o coeficiente de vazão, menor será a dimensão da estrutura para a mesma vazão de projeto e, consequentemente, menor será o custo final da obra.

O coeficiente de vazão para vertedores operando de forma livre, está diretamente relacionado com a forma geométrica do perfil vertente e com as pressões que se desenvolvem entre o escoamento e a superfície do vertedor. Tanto menor a pressão maior será o coeficiente de vazão. Infelizmente, a magnitude das pressões negativas tem um limite prático, acima do qual podem ocorrer danos à superfície do vertedor com o aparecimento do fenômeno chamado de *cavitação*¹. Há uma infinidade de formas de perfis de vertedores, entre eles de particular interesse, os do tipo Creager e

¹ Formação de bolhas de vapor em um líquido por efeito de forças de natureza mecânica.

Scimemi. Estes perfis têm como característica principal um elevado coeficiente de vazão e apresentam uma distribuição de pressões na superfície de contato com o escoamento aproximadamente constante e de valor próximo da pressão atmosférica. A idéia fundamental para a definição desta forma geométrica de perfil foi a de realizar o preenchimento com material sólido no vazio existente sob a lâmina vertente de um vertedor parede delgada sob pressão atmosférica.

Uma peculiaridade importante em relação aos primeiros perfis vertentes estudados, referia-se a ocorrência de picos de pressões negativas entre o paramento de montante e a crista do vertedor. Classicamente, a concordância entre o paramento de montante e o perfil vertente a jusante da crista é realizada por uma curva policêntrica composta por trechos de arcos de circunferência. A forma geométrica do perfil neste trecho do vertedor vem sendo estudada desde meados do século passado e até hoje é objeto de estudos.

Além do conhecimento do desempenho do perfil vertente operando de forma livre, não menos importante, é avaliar o funcionamento do vertedor com a presença de comportas. A utilização de comportas num barramento é importante para otimizar a estrutura vertente, uma vez que a operação pode ser iniciada com carga elevada em relação à crista permitindo a passagem da vazão de projeto num menor comprimento de vertedor, não sendo necessário o alteamento da barragem ou a construção de uma crista de comprimento elevado para vertedores que operam de forma livre. Contudo, a implantação de comportas acarreta algumas dificuldades e inconvenientes, tais como: a avaliação da vazão vertida quando a operação ocorre com abertura parcial e a ocorrência de vórtices junto ao paramento de montante da comporta.

A avaliação da vazão vertida em relação à abertura da comporta é de fundamental importância para a manutenção adequada do nível d'água do reservatório no caso da operação de usinas hidrelétricas. O cálculo da vazão é realizado através da introdução de um coeficiente de correção aplicado sobre a vazão teórica. O valor do coeficiente de correção, normalmente chamado de coeficiente de vazão da comporta, é função da contração e das perdas de energia do escoamento ao passar sob a

comporta. A forma geométrica do perfil, a carga de operação e a inclinação da comporta são alguns elementos que afetam a contração e perdas de energia do escoamento. A interação destes elementos é um fator importante para melhor avaliar a vazão descarregada por um vertedor quando da operação com abertura parcial de comportas.

As características geométricas da estrutura e a disposição dos diversos elementos que fazem parte do vertedor controlado por comportas, além de influenciar o valor do coeficiente de vazão, também exercem ação sobre o comportamento geral do escoamento nas proximidades do vertedor. Um fenômeno comum e de elevada complexidade é a formação de vórtices na região imediatamente a montante da comporta. Dependendo da intensidade dos vórtices, pode ocorrer o arraste de ar junto à região do núcleo, prejudicando a eficiência do vertedor em relação à vazão descarregada para a operação com aberturas parciais. Outro efeito negativo, caso o vórtice formado seja instável, é a vibração da comporta e da estrutura que dependendo da intensidade, pode comprometer a vida útil dos componentes responsáveis pela sua movimentação.

1.1. Motivação do Trabalho

A idéia de desenvolver um trabalho sobre vertedor de superfície e escoamento sob comportas surgiu em decorrência da importância do tema e de estudos de casos na área de atividade profissional do autor, ligada a estudos em modelos reduzidos. O assunto vertedor de superfície é ainda hoje objeto de muitos estudos na área de Engenharia Hidráulica. O tema torna-se interessante e complexo à medida que o vertedor de superfície é controlado por comportas. Durante a avaliação de estudos em modelos reduzidos em conjunto com o orientador da dissertação², observou-se a formação intensa de vórtices quando da operação de vertedores com abertura parcial de comportas, provocando instabilidade e descolamentos da lâmina líquida junto aos muros e pilares. Para amenizar o problema, foram realizadas diversas alterações na

² Prof. Dr. Kikuo Tamada

disposição e nas características geométricas dos elementos que compõem o vertedor permitindo melhor compreensão sobre o assunto.

1.2. Objetivo do Trabalho

Esta dissertação tem como objetivo apresentar uma pesquisa bibliográfica sobre o assunto vertedor de superfície, procurando apresentar o desenvolvimento dos perfis vertentes e possíveis mudanças na forma geométrica dos elementos que fazem parte de um projeto de vertedor e que influenciam no funcionamento e eficiência, principalmente, em relação ao coeficiente de vazão da estrutura operando de forma livre e com a presença de comportas. O presente trabalho é resultado da análise de diversos estudos realizados por outros pesquisadores, reunindo informações abrangentes para o entendimento geral de fenômenos que ocorrem na operação de um vertedor. A parte teórica é complementada com um estudo de caso em modelo físico reduzido, procurando verificar a influência sobre o aspecto geral do escoamento e o desempenho da estrutura vertente, decorrentes das alterações dos elementos que fazem parte do projeto de um vertedor.

1.3. Ordenação do Trabalho

O capítulo 2 apresenta alguns conceitos sobre a hidráulica dos vertedores, enfocando a evolução dos perfis vertentes ao longo do tempo e caracterizando as principais modificações nas formas geométricas e dimensões do vertedor, que exerçam influência sobre o coeficiente de vazão para a operação de forma livre.

No capítulo 3, é fornecido um embasamento teórico sobre o cálculo de vazão escoada sob comporta, apresentando trabalhos sobre a influência do posicionamento e da forma da comporta no comportamento do coeficiente de vazão para a operação do vertedor com abertura parcial.

A operação do vertedor com abertura parcial de comporta provoca a convergência do escoamento para o orifício, criando condições que favorecem o aparecimento de vórtices. A ocorrência deste fenômeno quando de intensidade elevada provoca um escoamento agitado a montante das comportas que se propaga para a jusante, causando descolamentos do escoamento junto à estrutura, prejudiciais ao desempenho do vertedor. O capítulo 4 apresenta uma abordagem sintética sobre o fenômeno, procurando verificar a origem da formação de vórtices, a classificação quanto à intensidade para a comparação entre modelo e protótipo e formas de prevenção quanto sua formação.

O capítulo 5 apresenta a descrição e os resultados do estudo em modelo reduzido e no capítulo 6 se encontram as principais conclusões deste trabalho.

2. VERTEDORES DE SOLEIRA LIVRE

2.1. Vertedor Retangular de Parede Delgada

Os vertedores são dispositivos utilizados para medir ou controlar a vazão escoada de um canal ou reservatório. Numerosos estudos foram realizados ao longo dos anos para definir formas geométricas adequadas dos descarregadores de barragens. Todos são baseados na forma do perfil inferior da lâmina líquida descarregada, perfeitamente arejada, sobre uma crista formada por um vertedor retangular de parede delgada, podendo ser interpretada como o princípio de lançamento de um projétil conforme apresentado na Fig. 2.1.

Fig. 2.1 - Lançamento de projétil e escoamento sobre a crista de um vertedor retangular de soleira delgada (Chow, 1959)

Os primeiros estudos sobre perfil de vertedor foram realizados utilizando o princípio da balística aplicando as equações da Física clássica sobre o escoamento no qual atua somente a força da gravidade. A componente horizontal de velocidade é considerada constante e a componente vertical é afetada pela ação da gravidade.

As equações da Física que governam o escoamento são:

$$x = V_i \cdot t \cdot \cos \varphi \quad \text{Eq. 2.1}$$

$$y = -V_i \cdot t \cdot \sin \varphi + \frac{1}{2} \cdot g \cdot t^2 + C' \quad \text{Eq. 2.2}$$

onde:

H_e - Carga total sobre a crista;

V_i - velocidade inicial;

t - variável tempo;

g - aceleração da gravidade;

E - espessura da lâmina vertente;

φ - ângulo de lançamento;

C' - constante;

Eliminando o tempo t nas duas equações e dividindo pela carga total H_e sobre a crista

e adicionando-se o termo $D = \frac{E}{H_e}$, obtém-se a equação da face superior do

escoamento na forma adimensional:

$$\frac{y}{H_e} = A \cdot \left(\frac{x}{H_e} \right)^2 + B \cdot \left(\frac{x}{H_e} \right) + C + D \quad \text{Eq. 2.3}$$

$$\text{onde: } A = \frac{g \cdot H_e}{2 \cdot V_i^2} \quad \text{Eq. 2.4, } B = -\tan \varphi \quad \text{Eq. 2.5, } C = \frac{C'}{H_e} \quad \text{Eq. 2.6 e } D = \frac{E}{H_e} \quad \text{Eq. 2.7}$$

Segundo Chow (1959) a velocidade de aproximação para descarregadores de *elevada* altura é *baixa* podendo ser ignorada, resultando nos seguintes valores:

$$A = -0,425, B=0,055, C=0,150 \text{ e } D=0,559$$

Para a determinação da capacidade de descarga são assumidas algumas hipóteses simplificadoras: distribuição hidrostática de pressão, além de desprezar efeitos oriundos da viscosidade do líquido, tensão superficial, turbulência e escoamentos secundários. Aplicando-se a equação de Bernoulli à linha de corrente DC e tomando como referência o plano horizontal passando por B tem-se:

$$H_c = \frac{p}{\gamma} + z_r + \frac{V^2}{2g} = \text{cte} \quad \text{Eq Bernoulli} \quad \text{Eq. 2.8}$$

$$H + \frac{V_o^2}{2g} = (H - y_c) + \frac{V_1^2}{2g} \quad \text{Eq. 2.9}$$

$$V_1 = \sqrt{2g(y_c + \frac{V_o^2}{2g})} \quad \text{Eq. 2.10}$$

Considerando a vazão unitária elementar $dq=V_1 \cdot dy$ numa faixa de altura “dy”, a integração ao longo da altura “H” permite calcular a vazão específica “q”.

$$q = \int_0^H V_1 dy = \sqrt{2g} \cdot \int_0^H \sqrt{y + \frac{V_o^2}{2g}} \cdot dy \quad \text{Eq. 2.11}$$

resultando em:

$$q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[\left(H + \frac{V_o^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_o^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad \text{Eq. 2.12}$$

Esta é conhecida como equação de Weisbach. Na seção de saída do escoamento sobre a soleira delgada existe o efeito de contração dos filetes, onde a distribuição de pressão afasta-se da hidrostática. O efeito da contração vertical do escoamento pode ser expresso pela introdução do coeficiente de contração C_c , resultando em:

$$q = \frac{2}{3} \cdot C_c \cdot \sqrt{2g} \cdot \left[\left(H + \frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_0^2}{2g} \right)^{3/2} \right] \quad \text{Eq. 2.13}$$

Expressando de modo mais conveniente a expressão anterior através da introdução do coeficiente de vazão, resulta em:

$$C_d = C_c \cdot \left[\left(1 + \frac{V_0^2}{2gH} \right)^{3/2} - \left(\frac{V_0^2}{2gH} \right)^{3/2} \right] \quad \text{Eq. 2.14}$$

$$q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} \quad \text{Eq. 2.15}$$

Os valores do coeficiente de contração C_c e o termo $V_0^2/2gH$ assim como o coeficiente de vazão C_d dependem da relação P/H (altura do vertedor / carga a montante). Para o vertedor de largura L , igual à largura do canal, a equação resulta em:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot L \cdot H^{3/2} \quad \text{Eq. 2.16}$$

A lei de descarga geral de um vertedor-extravador com largura L , adotando simplificação do coeficiente de vazão C_d segue a expressão:

$$Q = C_o \cdot L \cdot H^{3/2} \quad \text{Eq. 2.17}$$

2.3. Formas do Perfil Vertente

2.3.1 Perfis do Tipo Creager e Scimemi

A soleira de um descarregador de barragem é dita normal quando o perfil é tal que se verifica a pressão atmosférica local ao longo da soleira quando vertendo uma vazão Q . Bazin realizou estudos experimentais de 1886 a 1888 pesquisando o comportamento da lâmina líquida descarregada por um vertedor de parede delgada.

Scimemi apud Abecasis (1961) determinou experimentalmente o perfil da face inferior da lâmina descarregada por um vertedor vertical de parede delgada, conforme a equação a seguir:

$$\frac{y}{H_d} = 0,5 \cdot \left(\frac{x}{H_d} \right)^{1,85} \quad \text{Eq. 2.18}$$

Esta equação só é válida para a zona situada a jusante do ponto mais alto da face inferior da lâmina vertente, sendo este ponto a origem do eixo de coordenadas, definido por: x abscissa horizontal, y ordenada vertical e H_d a carga de projeto. O expoente 1,85 foi usado no lugar de 2 para considerar os efeitos de desenvolvimento da camada limite junto a soleira do vertedor. A forma da equação da face inferior de um jato livre é quadrática conforme demonstrado no item 2.1.

Creager apud Abecasis (1961) através dos dados do estudo de Bazin concluiu que a forma ideal de uma soleira descarregadora deve coincidir com o perfil inferior da lâmina vertente, porém penetrando-a ligeiramente, criando um novo perfil conhecido como perfil Creager definido por meio de tabelas. A Fig. 2.3 de Creager e Justin (1950) apresenta o perfil proposto por Creager com paramento de montante vertical para escoamento com velocidade de aproximação desprezável.

Fig. 2.3 - Perfil proposto por Creager (Creager e Justin , 1950)

Scimemi procurou determinar uma equação que traduz satisfatoriamente o perfil proposto por Creager e obtém:

$$\frac{y}{H_d} = 0,47 \cdot \left(\frac{x}{H_d} \right)^{1,80} \quad \text{Eq. 2.19}$$

Pimenta (1977) comparou o perfil Scimemi, o perfil Creager e a lâmina vertente livre de um vertedor de parede delgada vertical de *grande* altura conforme apresentado na Fig. 2.4.

Fig. 2.4 - Perfil Scimemi, Creager e lâmina livre (Pimenta, 1977)

É possível perceber que o perfil Creager penetra mais na face inferior da lâmina líquida em relação ao perfil Scimemi. Por isso, é de se esperar que as pressões no paramento do perfil Creager, funcionando com a carga de dimensionamento, devem ser positivas e pouco superiores em relação ao perfil Scimemi.

Segundo Abecasis (1961) são considerados três pontos importantes para definir a forma ideal do perfil:

- a) O coeficiente de vazão é tanto mais elevado quanto maiores as pressões negativas (pressões abaixo da pressão atmosférica) na sua crista e no paramento de jusante.
- b) Não é recomendável que na soleira de um vertedor as pressões sejam negativas.
- c) Preenchendo o espaço vazio da lâmina líquida descarregada livremente e perfeitamente arejada, no paramento desta superfície reinará uma pressão igual à atmosférica.

Atualmente recomenda-se que a distribuição de pressões no perfil de um vertedor deva ser isenta de pressões negativas *notáveis* que podem ser perigosas devido ao descolamento da lâmina vertente, aparecimento de vibrações e por vezes a ocorrência de cavitação, além de afetar a estabilidade da estrutura no caso de vertedores de *grande* altura devido ao incremento de empuxo horizontal.

Ao longo do tempo os perfis de vertedores foram sofrendo diversas modificações com o objetivo de torná-los práticos, econômicos, estáveis e eficientes.

2.3.2 Perfis do tipo USBR e WES

O U. S. Bureau of Reclamation (USBR, 1966) realizou diversos estudos e concluiu que a forma do perfil depende: da carga, da inclinação do paramento de montante, do nível d'água de jusante e da velocidade de aproximação. A equação do perfil do vertedor proposta pelo USBR é dada a seguir:

$$\frac{y}{H_e} = -K \left(\frac{x}{H_e} \right)^n \quad \text{Eq. 2.20}$$

onde:

- x e y - abscissa e ordenada do perfil do vertedor, respectivamente, com a origem na crista;
- H_e - carga total sobre a crista;
- K e n são parâmetros que dependem da inclinação do paramento de montante e da velocidade de aproximação;

A Fig. 2.5 mostra os elementos geométricos do perfil proposto por USBR.

Fig. 2.5 - Elementos geométricos do perfil do vertedor proposto por USBR (1966)

Os parâmetros K e n da equação do perfil do vertedor são obtidos através da Fig. 2.6.

Fig. 2.6 - Gráfico para a determinação dos parâmetros K e n da equação do perfil do vertedor proposto por USBR (1966)

Os parâmetros geométricos R_1 , R_2 , y_c e x_c da região entre a crista e o paramento de montante do vertedor são obtidos através da Fig. 2.7.

Fig. 2.7 - Gráfico para a determinação dos parâmetros geométricos R_1 , R_2 , y_c e x_c da região entre a crista e o paramento de montante do vertedor (USBR, 1966)

Utilizando a base de dados do U. S. Bureau of Reclamation, o U.S. Army Corps of Engineers apud Chow (1959) desenvolveu os perfis designados de WES - Waterways Experiment Station. Os perfis são representados através da seguinte equação:

$$x^n = K \cdot H_d^{n-1} \cdot y \quad \text{Eq. 2.21}$$

onde:

- K e n - são parâmetros que dependem da inclinação do paramento de montante. Os valores de K e n são indicados na Tab. 2.1;
- H_d - carga de projeto;

Tab. 2.1 - Valores de K e n para a determinação dos perfis WES

Inclinação do paramento de montante	K	n
vertical	2,0	1,85
1H :3V	1,936	1,836
2H :3V	1,939	1,810
3H :3V	1,873	1,776

Para vertedores com velocidade de aproximação significativa, o WES (1988) indica a utilização de perfis com paramento de montante inclinado (Fig. 2.8), porém ressalta que não foram realizados estudos em modelo reduzido para determinar as pressões no perfil vertente e o coeficiente de descarga das estruturas.

a. Inclinação do paramento de montante - 1H :3V

b. Inclinação do paramento de montante - 2H :3V

a. Inclinação do paramento de montante - 3H:3V

Fig. 2.8 - Perfis WES com paramento de montante inclinado

Nos primeiros perfis de vertedor, proposto por Scimemi, a concordância entre o paramento de montante e a crista era realizada por meio de um arco simples de circunferência. O USBR (1966) propôs curvas compostas por dois arcos de circunferência para a concordância entre a crista e o paramento de montante, conforme observado na Fig. 2.5. Estudos realizados por Abecasis (1961) mostraram que este tipo concordância provocava picos de pressões negativas acentuadas a montante da crista. Testes realizados em modelos físicos utilizando este perfil mostraram que a substituição da aresta viva no encontro com o paramento de montante por um pequeno arco com raio de circunferência de $0,04 \cdot H_d$, evitava o descolamento do escoamento e a ocorrência de pressões negativas. O trabalho de Abecasis apud Maynard (1985) se limitou ao perfil com paramento de montante vertical e com velocidade de aproximação desprezável. A adoção do raio de $0,04 \cdot H_d$ pode ser usado em ambos os perfis USBR e WES. A Fig. 2.9 mostra a distribuição de pressões ao longo do perfil do vertedor proposto pelo USBR com paramento de montante vertical, com e sem a utilização do raio de $0,04 H_d$ e a Fig. 2.10 mostra a alteração proposta a montante da crista, região onde a concordância entre a crista e o paramento de montante é constituída por três arcos de circunferência, incorporada ao manual da WES (1988) - Hydraulic Design Criteria (HDC).

Fig. 2.9 - Distribuição de pressões para perfil USBR com paramento de montante vertical antes e depois da adoção do raio de $0,04 H_d$. (Maynard, 1985)

a. Inclinação do paramento de montante - 1H:3V

b. Inclinação do paramento de montante - 2H:3V

b. Inclinação do paramento de montante - 3V:3H

Fig. 2.11 - Distribuição de pressões para perfis do tipo WES com paramento de montante inclinado (Lemos, 1981)

2.3.3 Perfil com Forma Geométrica de Elipse na Região a Montante da Crista

Maynord (1985) apresentou um estudo com os resultados de ensaios realizados, em modelo físico reduzido, utilizando a forma geométrica de elipse para a concordância entre a crista e o paramento de montante (Fig. 2.12), com diferentes inclinações do paramento de montante e velocidades de aproximação, complementando o trabalho iniciado por Melshemeirer e Murphy (1970) para vertedores com velocidade de aproximação desprezável e, Murphy (1973) que considerou diferentes inclinações do paramento de montante e velocidades de aproximação. Os parâmetros que definem as dimensões da elipse dependem da relação P/H_d , onde P é a altura do vertedor e H_d a carga de projeto. O perfil a jusante da crista é baseado nos dados do USBR, o qual

também depende da relação P/H_d ou velocidade de aproximação. A relação entre os parâmetros para diferentes relações de P/H_d é dada sob a forma de gráfico e pode ser encontrada no estudo do Maynard (1985) e no manual da WES - Hydraulic Design Criteria (HDC). O estudo abrange relações de P/H_d entre 0,25 e 2,0 levando em consideração mudanças na inclinação do paramento de montante e $P/H_d = 3,4$ para o paramento de montante vertical, mostrando resultados obtidos por Melsheimer e Murphy (1970).

Os resultados da distribuição de pressões para $H_e/H_d = 1$ e diferentes inclinações do paramento de montante e relações de P/H_d , mostraram valores positivos a montante da crista e valores próximos da pressão atmosférica para o trecho do perfil do USBR. Para $H_e > H_d$ ocorrem pressões negativas com maior intensidade nas proximidades da crista. É importante ressaltar que a adoção desta forma geométrica não apresenta picos de pressões negativas na região de concordância entre a crista e o paramento de montante para valores até $H_e = H_d$, diferentemente dos perfis do USBR anteriores a adoção do raio de $0,04H_d$ proposto por Abecasis (1961). A inclinação do paramento de montante não provoca a ocorrência de pressões negativas a montante da crista (Fig. 2.13) para $H_e = H_d$, ao menos para a inclinação de 1H:1V apresentada nos estudos, fornecendo indícios de que o ponto anguloso localizado na região de concordância dos perfis do tipo WES com paramento inclinado (Fig. 2.8) pode ser o responsável pelo comportamento deficiente em relação a distribuição de pressões.

Fig. 2.12 - Concordância em forma geométrica de elipse entre a crista e o paramento de montante (Maynord, 1985)

Inclinação do paramento de montante 1V:1H

Fig. 2.13 - Distribuição de pressões para o perfil estudado por Maynord (1985) para $P/H_d=1$, paramento de montante inclinado 1V:1H e sem pilares sobre a soleira

2.3.4 Perfil Lemniscata

Outros pesquisadores se dedicaram a estudar novas formas de perfis. Kanashiro (1989) estudou um perfil chamado lemniscata proposto por Souza¹ (1985) que tem como característica principal o desenvolvimento contínuo de sua curvatura. A concordância entre o paramento de montante e a crista do vertedor através da composição de arcos de circunferência proposta pelo WES e USBR, apesar da tangência possui descontinuidade em relação à curvatura nos pontos de concordância. A utilização em forma de elipse proposta por Murphy apud Maynard (1985) apesar da melhoria apresentada, possui descontinuidade no ponto de junção com o paramento de montante e na crista onde se liga ao perfil do tipo Creager. O perfil lemniscata apresenta dois pontos de curvatura não contínuos: o primeiro na junção com o paramento de montante e o outro na concordância com um elemento geométrico à jusante, região onde o escoamento é supercrítico $Fr > 1$ e não mais influência no coeficiente de vazão. A Fig. 2.14 mostra o aspecto geral do perfil lemniscata.

A lemniscata é uma curva definida da seguinte forma:

$$\rho_v = a_m \cdot \sqrt{\cos\left(\frac{\pi \cdot \alpha_i}{2 \cdot \alpha_o}\right)}, \text{ com } (-\alpha_o \leq \alpha_i \leq \alpha_o) \quad \text{Eq. 2.22}$$

onde:

ρ_v - raio vetor;

a_m - raio vetor máximo;

α_i - ângulo que o raio vetor faz com a_m ;

α_o - ângulo entre a tangente a lemniscata na origem e o raio vetor máximo;

Com o objetivo de conformar a lemniscata como um perfil vertente foi realizado a coincidência de três pontos com um perfil tipo Creager com paramento de montante vertical, impondo que as tangentes também fossem iguais nos dois perfis nestes pontos.

¹ Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza orientador da dissertação de Kanashiro.

Fig. 2.14 - Perfil lemniscata baseado no perfil Creager estudado por Kanashiro (1989)

No trabalho foi realizado um estudo comparativo com o perfil do tipo Creager e Maynord. Segundo Kanashiro (1985) o perfil com melhor desempenho em relação à distribuição de pressões foi o proposto por Maynord, seguido do Lemniscata e Creager, para cargas menores ou iguais à carga de projeto. Para cargas maiores que a de projeto o perfil lemniscata apresenta uma distribuição de pressão mais uniforme sem a presença de picos acentuados de pressões negativas. O autor ressalta o não aparecimento de pressões negativas no perfil lemniscata a montante da crista semelhante às que ocorriam antes da adoção do ajuste proposto por Abecasis, e ressalta que o perfil lemniscata apresentou o menor coeficiente de vazão para a carga de projeto, além de ser mais volumoso no trecho do perfil a montante da crista.

2.4. Recuo do Paramento de Montante

Na busca para otimizar os projetos de obras hidráulicas e minimizar o custo de construção, o perfil do vertedor pode ser projetado com um recuo no paramento de montante ocasionando uma economia significativa de material, conforme mostra a Fig. 2.15 para um vertedor com velocidade de aproximação desprezável. Chow (1959) recomenda a distância mínima de metade da carga de projeto abaixo da origem de coordenadas para o início do recuo. Nesta profundidade as velocidades de aproximação são *baixas* e o efeito sobre o perfil da face inferior do escoamento sobre a soleira pode ser desprezado. Segundo o USBR apud WES (1988) não é recomendada a relação $M_r/N_r < 0,5$.

Fig. 2.15 - Vertedor com recuo no paramento de montante (WES, 1988)

2.5. Coeficiente de Vazão de Vertedor Soleira Normal

2.5.1 Efeito da Altura do Vertedor

Em vertedores de *grande* altura a velocidade de aproximação é *baixa* e a superfície da lâmina vertente alcança a sua máxima contração. A medida que se diminui a profundidade do vertedor, a velocidade de aproximação aumenta e a contração diminui. Segundo Chow (1959), ensaios em modelo reduzido de vertedor tem mostrado que o efeito sobre a velocidade de aproximação é desprezável quando a altura do vertedor é maior que $1,33.H_d$ e o coeficiente de vazão é aproximadamente

constante. Para profundidades menores que $1,33.H_d$, a velocidade de aproximação tem efeito significativo provocando a diminuição do coeficiente de vazão. Quando há uma diminuição excessiva da altura do vertedor, a contração do jato se suprime por completo e o funcionamento do vertedor passa a ser do tipo soleira espessa. A Fig. 2.16 mostra o comportamento do coeficiente de vazão do vertedor em função da relação P/H_d .

Fig. 2.16 - Coeficiente de vazão do vertedor em função da relação P/H_d
(P =profundidade do vertedor e H_d = carga de projeto) USBR (1966)

2.5.2 Efeito de Cargas Diferentes da Carga de Projeto

A operação do vertedor com carga diferente da carga de projeto que foi utilizada para definir a forma do perfil, modifica a distribuição de pressões na soleira influenciando o coeficiente de vazão. Para cargas de operação abaixo da carga de projeto há uma redução do coeficiente de vazão e pressões positivas ao longo do perfil, enquanto que para cargas acima do valor de projeto há um aumento no coeficiente de vazão devido

ao aparecimento de pressões negativas. A Fig. 2.17 mostra a relação entre C_o' / C_o e H_e / H_d para diferentes relações de P / H_d , estabelecendo como referência o valor do coeficiente de vazão do vertedor tipo WES de *grande* altura com paramento de montante vertical.

Fig. 2.17 - Coeficiente de vazão do vertedor para carga de operação diferente da carga de projeto (C_o' - coeficiente de vazão para a carga de operação) (Chow, 1959)

O estudo realizado por Maynord (1985) mostra comportamento semelhante para a variação do coeficiente de vazão em relação à altura e carga de operação do vertedor. A Fig. 2.18 mostra o comportamento do coeficiente de vazão em função da relação P/H_d para diferentes relações entre a carga de operação e a carga de projeto H_e/H_d .

É possível perceber que mantendo constante a relação P/H_d , o aumento da carga de operação ocasiona um aumento no valor do coeficiente de vazão. O aumento é proporcionalmente maior para relações $H_e/H_d < 1$ e menor para $H_e/H_d > 1$. Para a mesma relação H_e/H_d , o aumento da altura do vertedor causa um aumento no valor do coeficiente de vazão.

A operação do vertedor para cargas acima do valor de projeto é conveniente em função do aumento do coeficiente de vazão, desde que não sejam atingidos valores de pressões cavitantes sobre a soleira. Para a relação $P/H_d = 2$ o aumento da relação de $H_e/H_d = 1$ para 1,5 provoca um aumento médio de 5% no coeficiente de vazão.

Fig. 2.18 - Coeficiente de vazão em função de P/H_d e H_e/H_d para vertedor com forma geométrica de elipse a montante da crista e paramento de montante vertical (Maynard, 1985)

2.5.3 Efeito da Inclinação do Paramento de Montante

Segundo o USBR (1966) para pequenas relações de profundidade de chegada em relação à carga de projeto P/H_d , a inclinação do paramento de montante provoca um aumento do coeficiente de vazão, enquanto que para grandes relações de P/H_d a inclinação do paramento provoca a diminuição no coeficiente de vazão. A Fig. 2.19 mostra a relação do coeficiente de descarga com paramento de montante inclinado em relação ao coeficiente de vazão com paramento vertical $C_d \text{ inclinado} / C_d \text{ vertical}$ em função de P/H_d .

Fig. 2.19 - Relação de $C_d \text{ inclinado} / C_d \text{ vertical}$ em função da profundidade relativa de aproximação P/H_d (USBR, 1966)

Segundo Maynard (1985), os perfis com a concordância entre o paramento de montante e a crista em forma de elipse, as relações de $P/H_d > 0,25$ apresentam diminuições no coeficiente de vazão com a inclinação do paramento de montante.

2.5.4 Efeito da Posição dos Níveis d'água a Jusante

Quando o nível d'água a jusante de um vertedor é suficientemente elevado para afetar a descarga diz-se que o vertedor está afogado ou submerso. Quando isto

acontece há uma redução do coeficiente de vazão em relação a operação de forma livre ou não afogada.

A influência da posição do nível d'água de jusante pode causar quatro tipos distintos de escoamento:

- Tipo I – O escoamento é supercrítico e a diminuição de vazão nesta zona não é causada pela submersão h_d/H_e , mas somente pela posição do leito de jusante representado pela relação $(h_d+d)/H_e$.
- Tipo II – Há a formação de ressalto hidráulico. Subindo o leito a jusante ou diminuindo a relação h_d/H_e forma-se o ressalto hidráulico, sendo o escoamento rápido a montante e lento a jusante.
- Tipo III – Há a formação de ressalto afogado. Diminuindo o valor de h_d/H_e , embora a lâmina líquida continue a seguir a forma do paramento da barragem, a profundidade da água a jusante é tal que o ressalto torna-se ondulado, salvo para valores de $(h_d+d)/H_e$ muito pequenos.
- Tipo IV – O escoamento é afogado com ondulações na superfície d'água (zona inferior do gráfico). Nesta região a diminuição do coeficiente de vazão é mais acentuada e o escoamento é muito instável exceto para baixos valores da relação $(h_d+d)/H_e$.

A Fig. 2.20 mostra a redução percentual que ocorre no coeficiente de vazão do vertedor em relação à condição não afogada, relacionando os níveis d'água de jusante em relação à carga de montante através das relações h_d/H_e e $(h_d+d)/H_e$ e a Fig. 2.21 apresenta o comportamento das pressões (linhas tracejadas) e da linha d'água (linhas contínuas) para as quatro formas de escoamento que podem ocorrer com o vertedor afogado.

Fig. 2.20 - Redução do coeficiente de vazão para crista afogada a jusante (WES, 1988 e Lencastre, 1983)

Fig. 2.21 - Comportamento da pressão sobre a soleira (linhas tracejadas) e da linha d'água (linhas contínuas) para crista afogada a jusante (Chow, 1959)

2.5.5 Efeito da Presença de Muros e Pilares

Muros e pilares são elementos que fazem parte do projeto de vertedores, principalmente, quando controlados por comportas. Quando estes possuem uma forma que produz contrações laterais sobre o escoamento, a largura efetiva utilizada pelo escoamento sobre a crista difere da largura real. A largura efetiva da crista do vertedor pode ser expressa por:

$$L_e = L_0 - 2 \cdot (NK_p + K_a) \cdot H_e$$

Eq. 2.23

onde:

- L_e - largura efetiva da crista;
- L_0 - largura real da crista;
- N - número de pilares;
- K_p - coeficiente de contração do pilar;
- K_a - coeficiente de contração lateral;
- H_e - carga total sobre a crista;

O coeficiente de contração varia em função das seguintes características: a forma dos muros e pilares, o posicionamento do bordo de ataque do pilar em relação à crista do vertedor, a carga de operação, a velocidade de aproximação, a operação de comportas adjacentes e a direção do escoamento em relação ao eixo do vertedor.

a) Coeficiente de contração lateral K_a - O WES (1988) realizou estudos em modelos reduzidos levando em consideração o coeficiente de contração de muros de aproximação, com forma circular para barragens com seção adjacente de concreto. Estudo semelhante foi realizado para avaliar o coeficiente de contração quando a região de aproximação ao vertedor é construída com o fechamento em talude de terra. O WES sugere o valor de 0,1 para barragens com seção adjacente de concreto e 0,2 para barragens com a região de aproximação em talude de terra para os valores de K_a . Estes valores são indicados quando as direções do escoamento e do eixo vertedor estão alinhadas. A Fig. 2.22 apresenta a variação do coeficiente de contração lateral K_a em função da relação entre a carga total e o raio do muro de aproximação H_e/R_a para barragens com a seção adjacente de concreto e a Fig. 2.23 apresenta a relação entre H_e/H_d e K_a para barragens com a região de aproximação ao vertedor com fechamento em talude de terra.

Fig. 2.22 - Coeficiente de contração lateral K_a para barragens com seção adjacente de concreto em função da relação H_e / R_a (R_a = raio do muro de aproximação) (WES, 1988)

Equação

$$Q = C_o [L_o - 2(NK_p + K_a)H_e] H_e^{3/2}$$

Onde: Q = vazão

C_o = coeficiente de vazão

L_o = largura real da crista

N = número de pilares

K_p = coeficiente de contração do pilar

K_a = coeficiente de contração lateral

H_e = carga total sobre a crista

Legenda

Símbolo	Projeto	R_a	W/L_o	W/P
□	DORENA	2	5.60	10.7
■	DORENA	4	5.60	10.7
○	RED ROCK *	7.8	3.42	16.5
●	CARLYLE *	9	8.44	75.5
△	WALTER F. GEORGE *	4	5.44	55.3

* vertedores com comportas e pilares

Nota: R_a = raio do muro de aproximação

W = Largura da região de aproximação

P = profundidade de aproximação

Fig. 2.23 - Coeficiente de contração lateral K_a para barragens com fechamento em talude de terra em função da relação H_c/H_d (WES, 1988)

Os gráficos da Fig. 2.22 e Fig. 2.23 apresentam dispersão dos pontos dos valores de K_a resultante das peculiaridades de cada projeto. É importante ressaltar que a topografia da região de aproximação é de fundamental importância e exerce forte influência na direção do escoamento e nos valores de K_a . Os valores obtidos nos gráficos devem ser utilizados nos cálculos preliminares como uma estimativa inicial do valor do coeficiente de contração lateral, para valores mais apurados é recomendável um estudo detalhado em modelo reduzido.

b) Coeficiente de contração do pilar K_p - O valor aproximado do coeficiente de contração do pilar K_p , segundo Creager e Justin (1950), é 0,1 para pilares espessos, 0,04 para pilares com bordo de ataque afinado e 0,035 para pilares redondos. Estes valores se aplicam para pilares com espessura igual a um terço da carga sobre o vertedor quando as comportas adjacentes estão abertas. Quando as comportas adjacentes estão fechadas sugere-se um aumento de aproximadamente 2,5 vezes no coeficiente de contração do pilar. A Fig. 2.24 mostra o comportamento do coeficiente de contração para diferentes formas do bordo de ataque do pilar propostas pelo WES (1988), quando a velocidade de aproximação é desprezável e as comportas adjacentes estão abertas. É fácil notar que o pilar do tipo 4 apresenta-se mais favorável em função da forma geométrica com baixos valores do coeficiente K_p , porém não é recomendável para elevados valores de H_e em razão da possibilidade de descolamento e desenvolvimento de pressões negativas *elevadas* junto ao pilar.

Formas do bordo de ataque do pilar

Nota : A face do pilar e do paramento de montante do vertedor estão no mesmo plano

Dimensões entre parênteses são do pilar 3A.

Fig. 2.24 - Efeito da forma do pilar sobre o coeficiente de contração K_p

A Fig. 2.25 apresenta os resultados de estudos do pilar tipo 2 para diferentes comprimentos do pilar em relação ao eixo do vertedor.

Fig. 2.25 - Efeito do comprimento do pilar sobre o coeficiente de contração K_p

A Fig. 2.26 apresenta os resultados de estudos do pilar tipo 2 com bordo de ataque arredondado para vertedores de pequena altura com velocidade de aproximação significativa.

Fig. 2.26 - Efeito da altura do vertedor sobre o coeficiente de contração K_p

3. ESCOAMENTO SOB COMPORTAS

O cálculo da vazão escoada por um vertedor operando com abertura parcial de comportas é um problema comum na hidráulica e vem sendo estudado há muito tempo. É importante o conhecimento da vazão para a manutenção correta do nível d'água do reservatório, principalmente, para a operação de usinas hidrelétricas.

Segundo Clemmens et al (2003) a complexidade do problema na determinação da vazão escoada sob abertura parcial está na dificuldade em se determinar a forma da superfície livre a jusante da comporta no caso de escoamento livre. O escoamento proveniente da seção sob a comporta sofre contração e passa por uma profundidade mínima chamada *vena contracta*. As dificuldades em se determinar o coeficiente de contração C_c é resultado das diversas configurações do escoamento através do orifício. O WES (1988) afirma que o coeficiente C_c é significativamente influenciado pelo ângulo formado entre a comporta e o fundo do canal.

O cálculo da vazão escoada por uma comporta parcialmente aberta, se faz normalmente através da introdução de um coeficiente de vazão para se considerar as perdas de carga e corrigir a hipótese adotada de que os vetores velocidades são perpendiculares a seção do orifício.

3.1. Coeficiente de Vazão para Escoamento sob Comporta

Para a demonstração do cálculo do coeficiente de vazão para o escoamento sob comporta, será utilizado o esquema correspondente a uma comporta plana instalada num canal com a mesma largura da comporta. A vazão descarregada pela comporta é função da carga de montante e da abertura do orifício podendo o escoamento ser considerado bidimensional. Em função da condição hidráulica a jusante, o escoamento sob a comporta pode ser classificado como livre ou afogado. Neste exemplo, será considerado a demonstração de escoamento livre, caso mais comum encontrado em vertedores de superfície.

A Fig. 3.1 mostra o exemplo de uma comporta plana vertical. A montante da comporta a energia disponível é o resultado da soma do tirante y_1 e da carga cinética $V_1^2/2g$, este último termo torna-se importante à medida que a relação a/y_1 aumenta. Pode ser observado que a jusante da seção de abertura da comporta o escoamento sofre uma contração vertical até alcançar uma altura mínima (*vena contracta*), correspondente a uma profundidade igual a $C_c \times a$. Na seção contraída as linhas de corrente são horizontais com distribuição hidrostática de pressão.

Fig. 3.1 - Comporta plana vertical (Porto, 1998)

Segundo Porto (1998), a determinação da vazão descarregada pode ser feita através da equação de energia e continuidade entre duas seções com alturas d'água uniformes (distribuição de pressão hidrostática). Considerando o escoamento livre a jusante e desprezando as perdas de carga entre as seções 1 e 2, pode-se escrever:

$$H_e = y_1 + \frac{Q^2}{2gy_1^3} = y_2 + \frac{Q^2}{2gy_2^3} \quad \text{Eq. 3.1}$$

isolando q:

$$q = y_1 \cdot y_2 \cdot \sqrt{\frac{2g}{y_1 + y_2}} \quad \text{Eq. 3.2}$$

considerando que $y_2 = C_c \cdot a$

$$q = C_c \cdot a \cdot \sqrt{2gy_1 \cdot \frac{y_1}{y_1 + C_c \cdot a}} \quad \text{Eq. 3.3}$$

De onde:

$$q = C_c \cdot a \cdot \sqrt{\frac{y_1}{y_1 + C_c \cdot a}} \cdot \sqrt{2gy_1} \quad \text{Eq. 3.4}$$

O coeficiente de descarga que corrige a vazão teórica é:

$$C_d = \frac{C_c}{\sqrt{1 + \frac{C_c \cdot a}{y_1}}} \quad \text{Eq. 3.5}$$

Resultando em:

$$q = C_d a \sqrt{2gy_1} \quad \text{Eq. 3.6}$$

Esta equação tem a forma da lei dos orifícios e é aplicada para comportas planas e radiais, sendo a principal diferença o valor do coeficiente de contração. Para o caso de orifícios circulares de parede fina, o valor médio prático do C_d é aproximadamente 0,61, podendo variar em relação às dimensões e com o valor da carga a montante.

Para orifícios de pequenas dimensões, Lencastre (1960) afirma que o coeficiente de velocidade C_v traduz a influência do atrito e da viscosidade sobre o escoamento, podendo variar entre 0,96 e 0,99. Considerando o C_v próximo de 1, o coeficiente de contração C_c decresce a valores em torno de 0,60, concluindo que a contração da lâmina é a principal responsável pela diminuição do valor do coeficiente de vazão.

3.1.1 Influência do Número de Reynolds

A Fig. 3.2 apresenta as variações dos coeficientes C_d , C_v e C_c de um orifício de seção circular em função do número de Reynolds.

Fig. 3.2 - Variação dos coeficientes C_d , C_v , e C_c de um orifício circular com o número de Reynolds (Pimenta, 1977)

Segundo Pimenta (1977), observando a Fig. 3.2 verifica-se que:

- O coeficiente C_v aumenta com o Re , o que traduz a diminuição das perdas devidas à viscosidade.
- O coeficiente C_c diminui quando Re aumenta devido à diminuição da frenagem do líquido nos bordos do orifício e aumento do raio de curvatura dos filetes entre o orifício e a seção contraída.
- O coeficiente de vazão C_d que é o produto de $C_v \cdot C_c$, aumenta com Re , passando por um máximo que corresponde a $Re=350$ e depois diminui novamente tendendo assintoticamente para um valor na região do $Re > 10^5$.
- Os coeficientes C_v e C_c , quando Re atinge valores elevados, tendem para os valores correspondentes ao líquido perfeito $C_v \rightarrow 1$ e $C_c \rightarrow 0,6$.
- Quando o valor de Re é muito pequeno há a predominância da viscosidade e a contração praticamente se anula. Para $Re \rightarrow 0$, $C_c \rightarrow 1$.

Avila apud Pinto (1992) afirma que na maioria dos problemas práticos se supera o número de Reynolds a partir do qual se tem a independência dos coeficientes em relação a ele. É fácil perceber para o problema de orifício circular da Fig. 3.2 que a partir do número de $Re > 10^5$ os coeficientes praticamente não se alteram.

3.1.2 Orifícios de Grandes Dimensões

Segundo o USBR (1966) a descarga por um vertedor, quando as comportas estão parcialmente abertas, é semelhante a um orifício podendo ser calculado através da seguinte expressão:

$$Q = \frac{2}{3} \cdot C_d \cdot A_o \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_1^{\frac{3}{2}} - H_2^{\frac{3}{2}}) \quad \text{Eq. 3.7}$$

onde:

- H_1 - Carga em relação à borda inferior do orifício;
- H_2 - Carga em relação à borda superior do orifício;
- A_o - área do orifício;
- Q - vazão;
- C_d - coeficiente de vazão;

O método utilizado para o cálculo da vazão foi a integração da vazão elementar através de uma faixa de altura infinitesimal. Segundo Porto (1988), esta equação é válida para orifícios de grandes dimensões em que a carga sobre o centro de gravidade do orifício é menor do que três vezes a dimensão vertical do mesmo.

A Fig. 3.3 apresenta um gráfico com valores médios de coeficiente de vazão C_d do orifício em relação a a / H_1 para o vertedor soleira normal.

Fig. 3.3 - Coeficiente de vazão C_d em função da relação a/H_1 (USBR, 1966)

3.1.3 Efeito da Inclinação do Paramento da Comporta em Relação ao Fundo

3.1.3.1 Comportas Planas

O coeficiente de vazão de um vertedor controlado por comportas apresentará influência das condições de aproximação em função da forma e posicionamento da comporta em relação ao perfil vertente.

O ângulo de inclinação da comporta é um dos elementos que afeta significativamente o coeficiente de vazão do orifício através da influência do coeficiente de contração. Nago (1983) estudou a variação do coeficiente de vazão de uma comporta plana sobre um fundo plano para diversas formas geométricas, inclinações e espessuras de comporta.

A Fig. 3.4 apresenta esquematicamente a experiência realizada por Nago (1983) para uma comporta plana submetida a diferentes inclinações em relação a um fundo de canal plano. Este estudo foi realizado em modelo reduzido com um canal de largura de 40cm e abertura de comporta de 6,0cm.

Fig. 3.4 – Representação esquemática de uma comporta plana inclinada sobre o fundo plano (Nago, 1983)

A Fig. 3.5 apresenta o coeficiente de contração C_c para a comporta plana em função do ângulo de inclinação em relação ao fundo do canal e da relação a/H e a Fig. 3.6 apresenta a variação do coeficiente de vazão C_Q para as mesmas condições.

Fig. 3.5 - Coeficiente de contração em função do ângulo de inclinação da comporta e da relação a/H segundo Nago (1983)

Fig. 3.6 - Coeficiente de vazão em função do ângulo de inclinação da comporta plana e da relação a/H (Nago 1983)

É possível perceber que mantendo a relação a/H constante, há uma diminuição do coeficiente de vazão com o aumento do ângulo β da comporta e para a mesma inclinação de comporta o coeficiente de vazão diminui com o aumento da relação a/H . Este comportamento é semelhante ao apresentado pelo coeficiente de contração da figura anterior (Fig. 3.5).

3.1.3.2 Comportas Radiais

A Fig. 3.7 mostra um exemplo de comporta radial com fundo plano. O ângulo de inclinação da comporta é dado pela tangente ao lábio da comporta com a horizontal.

Fig. 3.7 - Comporta radial sobre um fundo plano (Pinto, 1992)

Para os exemplos citados nas Fig. 3.4 e Fig. 3.7, o valor da abertura da comporta “a” e a profundidade “H” são facilmente obtidos em função da existência do fundo plano horizontal. A abertura “a” e a profundidade “H” são dados pela distância vertical entre o lábio da comporta e do nível d’água, respectivamente, até o fundo do canal.

Pinto (1992) apresentou um trabalho analisando o comportamento do escoamento sob comportas baseado num diagrama de vetores velocidade apontando para um único ponto, chamado de ponto-foco, não coincidente com a projeção da comporta e com o fundo curvo. Hipótese semelhante foi inicialmente proposta por Koch (1926) apud Pinto (1992) para um canal de fundo plano, porém com o ponto-foco

coincidente com a projeção da comporta. As Fig. 3.8 e Fig. 3.9 apresentam a hipótese de convergência dos vetores velocidades propostas por Koch e Pinto, respectivamente.

Fig. 3.8 - Hipótese proposta por Koch (Pinto, 1992)

Fig. 3.9 - Hipótese proposta por Pinto (1992)

A Fig. 3.10 apresenta de forma esquemática os principais parâmetros geométricos do método utilizado por Pinto (1992) para apresentar o modelo simplificado de escoamento sob comportas utilizando um perfil do tipo soleira normal, com fundo curvo e comporta radial. Para verificar o comportamento do ponto-foco sob

diferentes condições de operação foram desenvolvidas equações para o cálculo da abertura efetiva “a”, menor distância entre o lábio da comporta e a soleira do vertedor, e para a integração do perfil de velocidades convergentes ao ponto-foco, localizado na reta tangente ao perfil vertente que passa pelo ponto de abertura efetiva.

Fig. 3.10 - Comporta radial sobre um perfil soleira normal (Pinto, 1992)

Para a calibração do modelo foram utilizados dados de modelos reduzidos e de Gentilini, responsável por uma série de experimentos de comportas planas e radiais do cálculo do coeficiente de vazão C_d e distribuições de pressões. Recentemente estes dados foram ajustados por Cozzo verificando uma tendência linear quando em função do número de Froude calculado a montante das comportas plana e radial. Os gráficos são apresentados nas Fig. 3.11 e Fig. 3.12.

Fig. 3.11 - Coeficiente de vazão em função do número de Froude obtidos por Gentilini para comporta plana, segundo Cozzo (Pinto, 1992)

Fig. 3.12 - Coeficiente de vazão em função do número de Froude obtidos por Gentilini para comporta radial, segundo Cozzo (Pinto, 1992)

Segundo Pinto (1992), os resultados apresentados por Cozzo mostram que o coeficiente de vazão C_d é maior para comporta plana quando comparado aos valores da comporta radial, especialmente para elevados valores do ângulo β . A explicação dada para este fato, segundo o autor, é de que os filetes superiores do fluxo se conformam melhor ao formato plano com o surgimento de camada-limite, além do fato de que na utilização de comporta radial, existe uma maior tendência de formação de vórtices na região acima da abertura ocasionando perdas de carga e consequentemente o decréscimo de C_d .

O objeto de estudo da dissertação de Pinto (1992) foi verificar o comportamento da distância m entre a seção de abertura real de comporta e o ponto-foco. A localização do ponto de convergência do perfil de velocidades é variável em cada abertura de comporta, conforme a relação a/H e também conforme a localização e raio da comporta. A formulação do cálculo da abertura real de comporta para um perfil soleira normal foi deduzida por Pinto para diferentes posições do ponto de batente no perfil do vertedor e encontra-se no referido trabalho. O cálculo da vazão resultante da convergência dos vetores velocidades é dada a partir da seguinte equação:

$$Q = m L \sqrt{2g} \int_0^a \sqrt{\left(\frac{H - w \cos \gamma_f}{m^2 + w^2} \right)} dw \quad \text{Eq. 3.8}$$

Os resultados do trabalho mostram a diminuição da relação m/a com o crescimento de a/H e do ângulo de inclinação da comporta. O crescimento de a/H , para abertura de comporta mantida constante, representa a diminuição da carga a montante e menor inércia dos filetes fluidos convergentes para a abertura. O aumento da inclinação da comporta provoca a diminuição da relação m/a em função da orientação a comporta exerce sobre os filetes superiores. Estas observações são coerentes com os resultados dos coeficientes de contração obtidos por Nago para a comporta plana apresentada na Fig. 3.5, mostrando uma diminuição do C_c com o crescimento de a/H e aumento do ângulo de inclinação da comporta, representado na abordagem de Pinto pela diminuição da relação m/a ou o aumento da inclinação dos vetores velocidade em relação a perpendicular da seção de abertura efetiva.

O WES (1988) através de estudos em modelos reduzidos e de protótipos verificou o comportamento do coeficiente de vazão em função do ângulo de abertura da comporta β . Nos cálculos foi utilizada a abertura real da comporta semelhante ao estudo de Pinto (1992). É importante observar na Fig. 3.13 que os valores dos coeficientes de vazão dependem da localização do ponto de batente da comporta no perfil vertente. Os dados foram baseados em testes com a operação de três ou mais vãos adjacentes para evitar contração adicional do escoamento na operação de apenas um único vão.

Fig. 3.13 - Coeficiente de vazão para vertedor perfil normal controlado por comporta radial (WES, 1988)

3.1.4 Efeito da Forma e Dimensões da Comporta

Nago (1983) estudou a variação do coeficiente de vazão em função das características geométricas de uma comporta sobre o fundo plano. A Fig. 3.14 apresenta uma comporta com a inclinação do fundo e espessura variáveis e a Fig. 3.15 mostra o comportamento do coeficiente de vazão para a inclinação do fundo da comporta igual a 45° .

Fig. 3.14 - Comporta com fundo inclinado (Nago, 1983)

Fig. 3.15 - Coeficiente de vazão para $\beta=45^\circ$, comporta com fundo inclinado (Nago, 1983)

Segundo Nago (1983) o comportamento do coeficiente de vazão para comportas com relação $d_c/a > 1$ e da comporta plana inclinada com a mesma inclinação de fundo são semelhantes, ou seja, para comportas com espessura maior que a dimensão da abertura do orifício, o comportamento do coeficiente de vazão é função apenas da inclinação do fundo da comporta. É possível notar a semelhança com os valores do coeficiente de vazão para a curva com inclinação de 45° do gráfico da Fig. 3.6 para a comporta plana.

A Fig. 3.14 apresenta uma comporta com o paramento de montante inclinado e com um prolongamento vertical de comprimento variável na região do lábio e a Fig. 3.17 apresenta o comportamento do coeficiente de vazão da comporta em função da relação l/a e a/H para a inclinação de 45° do paramento de montante.

Fig. 3.16 - Comporta inclinada com extensão vertical (Nago, 1983)

Fig. 3.17 - Coeficiente de vazão para $\beta=45^\circ$, comporta com extensão vertical (Nago, 1983)

Segundo Nago (1983) os valores do coeficiente de vazão decrescem rapidamente com o aumento do comprimento do prolongamento vertical do lábio e quando a relação l/a assume valores próximos de 1, o comportamento do coeficiente de vazão é semelhante ao apresentado pela curva da Fig. 3.6 para a inclinação de 90° da comporta plana.

Rouse (1949) afirma que podem ocorrer problemas de vibração em comportas planas em função do descolamento do escoamento junto ao lábio com forma não adequada. O autor sugere a forma estudada pelo WES apresentada na Fig. 3.18.

Fig. 3.18 - Modelo de comporta plana estudada pelo WES (Rouse, 1949)

3.2. Pressões na Soleira do Vertedor

Quando os vertedores funcionam com abertura parcial de comportas a seção de controle trabalha como orifício inclinado e há a possibilidade de ocorrência de pressões negativas junto à soleira.

A equação da lâmina líquida com o orifício inclinado é:

$$-y_o = x_o \cdot \tan(\xi) + \frac{x_o^2}{4.H.\cos^2(\xi)} \quad \text{Eq. 3.9}$$

onde:

- y_o e x_o - são, respectivamente, a ordenada e a abscissa com origem no centro do orifício;
- ξ - ângulo entre seção do orifício e a vertical;
- H - carga em relação ao centro do orifício;

Quando a abertura de comporta é pequena em relação à carga e o perfil do vertedor é do tipo normal, podem ocorrer pressões negativas imediatamente a jusante da comporta. Segundo o USBR (1966), experiências mostram que quando as comportas operam com aberturas pequenas e cargas elevadas, ocorrem pressões negativas da ordem de um décimo da carga de projeto ao longo do perfil na região imediatamente a jusante da comporta. Para contornar o problema pode-se alterar o perfil do vertedor segundo a trajetória da veia líquida do orifício, porém poderá haver uma redução no coeficiente de vazão quando o vertedor trabalha de forma livre com abertura total de comportas. A Fig. 3.19 mostra a região do perfil sujeita a ocorrência de pressões negativas.

Fig. 3.19 - Região do perfil sujeita a ocorrência de pressão negativa para abertura parcial de comporta (USBR, 1966)

Outra alternativa para minimizar a intensidade das pressões negativas é posicionar o ponto de batente da comporta num ponto mais a jusante do perfil, inclinando a seção transversal do orifício fazendo a lâmina líquida ajustar-se melhor a forma do perfil. Em relação à redução de custos do projeto, a solução mais econômica seria posicionar o batente da comporta radial na região da crista e com a linha que passa pelas extremidades da comporta na posição vertical. Classicamente, a comporta é inclinada com o ponto de batente a jusante da crista e com a extremidade inferior da comporta deslocada para montante, seja por questões de ordem técnica ou para permitir a construção de uma via de passagem e instalação de equipamentos acima da crista.

Lemos (1975) realizou um estudo experimental em modelo reduzido para verificar o comportamento das pressões ao longo do perfil para diferentes cargas, posições do ponto de batente no perfil e do eixo de rotação da comporta radial para o vertedor perfil normal com paramento de montante vertical. A instalação experimental é apresentada na Fig. 3.20.

Fig. 3.20 – Instalação experimental (Lemos, 1975)

Em 1981, Lemos retomou o problema para os perfis do tipo WES com paramento de montante inclinado. A Fig. 3.21 mostra a definição dos parâmetros adimensionais e as Fig. 3.22 e Fig. 3.23 mostram a distribuição de pressões para duas posições distintas do ponto de batente da comporta $A / H_d = -0,1$ e $A / H_d = 0,2$ para vertedor com paramento de montante vertical.

Fig. 3.21 - Definição dos parâmetros adimensionais para comportas radiais
(Lemos, 1975)

Fig. 3.22 - Distribuição de pressões ao longo do perfil do vertedor com paramento de montante vertical, para a posição do batente da comporta localizado a montante da crista em $A/H_d = -0,1$ (Lemos, 1981)

Fig. 3.23 - Distribuição de pressões ao longo do perfil do vertedor com paramento de montante vertical, para a posição do batente da comporta localizado a jusante da crista em $A/H_d = 0,2$ (Lemos, 1981)

É interessante observar que o deslocamento do ponto de batente da comporta para a jusante para algumas situações estudadas por Lemos (1981), apresentaram uma tendência de aumento do valor médio das pressões considerando a mesma carga de projeto, tornando a soleira do vertedor menos sujeita à ocorrência de cavitação.

Os valores picos de pressões negativas para diferentes posições do batente da comporta são, em média, maiores que o valor $H_d/10$ apresentado pelo USBR (1966) conforme observado na Fig. 3.19.

A forma geométrica inadequada dos perfis tipo WES com paramento de montante inclinado, conforme mencionado no item 2.3.2, não permitiu uma conclusão definitiva segundo Lemos, recomendando aperfeiçoar a forma geométrica e posteriormente realizar novos estudos.

4. ESTUDO SOBRE VÓRTICES

A presença de vórtices junto às tomadas d'água de usinas hidrelétricas e vertedores quando da operação de abertura parcial de comportas são indesejáveis. O entendimento do processo que leva a formação de vórtices é de grande interesse dos engenheiros em razão da frequência de ocorrência do fenômeno em obras hidráulicas e em virtude das dificuldades de detectar-se as causas de sua origem. A determinação de parâmetros relevantes na análise do problema e o tratamento analítico capaz de prever a possibilidade de ocorrência e a intensidade dos vórtices em diferentes estruturas são objetos de estudos de muitos pesquisadores.

Dependendo da intensidade do vórtice pode ocorrer o arraste de ar para o interior do conduto forçado como no caso de uma tomada d'água. O arraste de ar reduz o coeficiente de vazão da estrutura ocupando o espaço que seria ocupado pelo líquido, além de provocar vibrações junto às turbinas e comportas de vertedores. O inconveniente causado pela ocorrência de vórtices em estruturas hidráulicas é grande, Denny apud Raju (1978) relataram que a adução de cerca de 1% em volume de ar causa uma redução de cerca de 15% na eficiência de uma bomba centrífuga. Posey e Hsu observaram uma redução de até 80% no coeficiente de vazão de uma embocadura em virtude da formação de vórtices, o que pode ocasionar o galgamento de barramentos com extravasores que operam afogados e são suscetíveis a formação de vórtices.

Devido à complexidade do problema e das características geométricas particulares de cada projeto, frequentemente são utilizados modelos reduzidos baseados na semelhança de Froude para investigar e tentar obter uma resposta confiável do fenômeno de formação de vórtices, porém em muitos casos os resultados são controversos. Uma das principais dificuldades para representar o fenômeno adequadamente é a ocorrência do chamado *efeito de escala* que surge devido à impossibilidade de reduzir todas as forças pertinentes ao fenômeno pelo mesmo fator. No caso particular da formação de vórtices a viscosidade e a tensão superficial são duas grandezas que muitos autores consideram ter forte influência no fenômeno,

principalmente, quando ocorre a incorporação de ar no escoamento. Diversas pesquisas tem sido realizadas com o objetivo de verificar a magnitude dos efeitos de escala na formação de vórtices e aprimorar técnicas para minimizar tais efeitos.

O objetivo desta parte do trabalho é desenvolver um estudo sintético sobre o fenômeno abordando os seguintes assuntos: os modelos simples de vórtice, as causas de sua formação, a comparação entre modelo e protótipo e as possíveis medidas que possam ser aplicadas para minimizar ou eliminar a ocorrência de vórtices capazes de prejudicar o desempenho de estruturas hidráulicas.

4.1. Modelo Simples de Vórtices

Definição de Circulação

A circulação de um vetor velocidade é definida como sendo a integral de linha ao longo de um contorno fechado num instante t , da componente tangencial desta velocidade ao longo da trajetória, onde c é o contorno fechado.

$$\Gamma = \int_c \vec{V} \cdot d\vec{s} \quad \text{Eq. 4.1}$$

Para verificar a irrotacionalidade de um conjunto de partículas como um todo, utiliza-se o conceito de circulação.

4.1.1 Vórtice Forçado

O vórtice forçado é definido como o movimento de rotação de todo o corpo fluído como um corpo rígido. Este vórtice se verifica no caso de uma cuba em movimento de rotação, em que a lei de distribuição de velocidade é do tipo rotacional, dada por

$V_t = \omega \cdot R$, com ω a velocidade angular. A equação da superfície livre do vórtice forçado é dada por:

$$h = h_o + \frac{\omega^2 \cdot r^2}{2g} \quad \text{Eq. 4.2}$$

A Fig. 4.1 a seguir apresenta esquematicamente a superfície livre do vórtice forçado.

Fig. 4.1 - Vórtice forçado (Aoki, 1986)

4.1.2 Vórtice Livre

O movimento giratório ao redor de um eixo vertical afastado do eixo de rotação, provocado pelo escoamento através de um orifício situado no fundo do reservatório corresponde ao vórtice livre, conforme apresentado na Fig. 4.2. Considerando somente a componente da velocidade na direção tangencial, cujo valor da distância r do eixo, obedece à lei $V_t = K_c / r$, com K_c constante. A circulação para um caminho fechado que não inclua o centro de rotação é igual a zero, o movimento é assim

irrotacional para todo o campo fluido. Para um caminho circular que inclua o centro de rotação a circulação será:

$$\Gamma = 2 \pi r V_t = \text{constante} \quad \text{Eq. 4.3}$$

A equação acima representa o produto da órbita de uma partícula pela sua velocidade tangencial V_t ao longo de sua órbita.

Fig. 4.2 - Vórtice livre (Durgin e Hecker, 1978)

Segundo Cuomo (1981), considerando que $V_t \cdot r = \text{cte}$ e que $\rho / V_t r$ representa o momento angular da unidade de volume do fluido, é natural que a magnitude do produto constante $V_t r$ pode ser considerado como elemento representativo dos vórtices.

A equação da superfície livre do vórtice irrotacional é dada pela equação de Bernoulli, dada a seguir:

$$\rho g z + p + \rho \frac{V_t^2}{2} = \text{cte} \quad \text{Eq. 4.4}$$

4.1.3 Vórtice Combinado de Rankine

A extensão do movimento irrotacional do vórtice livre em direção ao eixo de rotação, considerando a distribuição de velocidade $V_t = K_c / r$ fica fisicamente não aceitável quando r tende a zero, porque a velocidade tende ao infinito. Portanto, nas proximidades do eixo o modelo falha. De fato se as velocidades aumentam demasiadamente o atrito viscoso exerce sua influência no movimento e como consequência a coluna de fluido nas proximidades do eixo é compelida a rodar como um corpo sólido. Assim, para valores de r menores que um determinado valor “ a_v ”, o movimento do fluido assume o modelo chamado de vórtice forçado. A composição de um vórtice livre com um vórtice forçado como núcleo é chamado de vórtice de Rankine, representando razoavelmente a maioria dos vórtices naturais. A Fig. 4.3 mostra o modelo proposto por Rankine.

Fig. 4.3 - Vórtice combinado de Rankine (Aoki, 1986)

Levi (1972) afirma que o perfil de velocidade tangencial dentro de um tornado que é um vórtice natural, é normalmente similar ao vórtice de Rankine com o núcleo do vórtice de baixa pressão. A Fig. 4.4 apresenta o mecanismo de formação do tornado. Retomando o trabalho anterior, Levi (1991) mostra que o mecanismo de formação do tornado em função da movimentação do ar atmosférico explica porque o movimento de um vórtice é sempre descendente e que o início de sua formação é na região inferior, na zona de convergência do escoamento.

Fig. 4.4 - Mecanismo de formação do tornado (Levi, 1972)

4.2. Causas da Vorticidade

As condições de aproximação a estrutura de descarga e a forma dos contornos físicos que influenciam nas características hidráulicas do escoamento na região de aproximação provocando turbilhões e movimentos giratórios do fluxo, determinam as chamadas fontes de vorticidade.

Segundo Durgin e Hecker (1978) a maioria dos tipos de vórtices consiste na combinação de três tipos fundamentais que são apresentados na Fig. 4.5. No

primeiro tipo, a rotação do fluido próximo a estrutura de adução resulta basicamente da assimetria no canal de aproximação. Neste caso a forma geométrica do emboque induz ao movimento rotacional e a viscosidade não afeta a vorticidade do fluxo. No segundo tipo o perfil de velocidade induzido pelas tensões viscosas e a presença de contornos sólidos são fontes de vorticidade. Apesar da simetria do canal de aproximação, a ocorrência de vorticidade em um único sentido de rotação pode ser ocasionado por pequenas assimetrias do escoamento afluyente. No terceiro tipo, as causas de vorticidade são causadas pela presença de obstruções na região de aproximação à estrutura de adução. As duas últimas fontes são influenciadas pela viscosidade e consequentemente dependentes do número de Reynolds.

Fig. 4.5 - Fontes de vorticidade segundo Durgin e Hecker (1978)

Segundo Aoki (1986) uma quarta fonte de vorticidade deve ser adicionada às três fontes citadas anteriormente, que é caracterizada pela ocorrência de *separação* ou *descolamento* que ocorre em arestas ou assimetria localizada, como a presença de muros e pilares frequentemente encontrados em usinas hidrelétricas. Os descolamentos ocorrem quando o fluxo tangencia uma massa d'água imóvel chamada de *zona morta*. A Fig. 4.6 ilustra a região de emboque de uma estrutura onde há a ocorrência deste tipo de fonte de vórtice.

Fig. 4.6 - Fonte de vorticidade em razão da presença de massa d'água imóvel

4.3. Comparação Modelo-Protótipo

Em razão da complexidade do fenômeno de formação de vórtices é muito difícil realizar uma previsão teórica, levando-se em consideração as diversas configurações possíveis de serem adotadas em um projeto. Normalmente são necessários estudos em modelos reduzidos para permitir uma percepção mais concreta em relação à ocorrência e a intensidade do fenômeno.

Pimenta (1981) afirma que a pesquisa em modelos reduzidos para fornecer suporte técnico para problemas de hidrodinâmica é baseada na teoria da semelhança mecânica. A teoria diz que dois escoamentos são mecanicamente semelhantes quando, realizam-se segundo trajetórias semelhantes e apresentam em instantes homólogos uma relação entre as velocidades em pontos homólogos, outra relação constante entre as acelerações em pontos homólogos e ainda outra relação entre as

forças em pontos homólogos e assim para as outras grandezas físicas que intervêm no movimento.

Segundo Fox (1987) a primeira exigência para a condição de similaridade entre o escoamento do modelo e do protótipo é que sejam geometricamente similares. A similaridade geométrica significa que as dimensões lineares entre o modelo e o protótipo se relacionam entre si por um fator de escala. Outro requisito contido na definição é a proporcionalidade das grandezas tais como: velocidades, acelerações e os intervalos de tempo em instantes e pontos homólogos, chamada de semelhança cinemática.

É necessário além da construção e operação do modelo em si obedecendo aos critérios de semelhança mecânica, o conhecimento das grandezas que intervêm no fenômeno. Os parâmetros adimensionais que governam o escoamento e as relações de dependência entre os mesmos, podem ser determinados a partir de uma análise dimensional que incluem todas as grandezas envolvidas no estudo.

Anwar et al. (1978) utilizando uma instalação experimental para estudar a formação de vórtices numa embocadura disposta horizontalmente (Fig. 4.7) consideraram as seguintes grandezas para a análise dimensional: A submersão s , a circulação $\Gamma = V_t r$, onde V_t é a velocidade tangencial e r a distância do ponto de medição de velocidade ao eixo de rotação do vórtice, o diâmetro do emboque D , a distância vertical h medida entre fundo do tanque até o eixo da embocadura, a vazão Q , a viscosidade cinemática ν , a massa específica ρ , a tensão superficial σ e a aceleração da gravidade g .

Fig. 4.7 - Instalação experimental para o estudo de vórtices (Anwar et al., 1978)

A análise dimensional destas variáveis conduziu a seis parâmetros adimensionais, escritos da seguinte forma:

$$f = \left(\frac{\Gamma D}{Q}, \frac{s}{D}, \frac{Q}{A_c \sqrt{2gs}}, \frac{b}{D}, \frac{Q}{v s}, \frac{\rho Q^2 s}{A_c^2 \sigma} \right) \quad \text{Eq. 4.5}$$

onde $Q / v s$ é o número de Reynolds e $\rho Q^2 s / A_c^2 \sigma$ é o número de Weber.

O número de Reynolds é a relação entre as forças de inércia, representadas pela velocidade V e as forças viscosas, representadas pelo coeficiente de viscosidade cinemática v do fluido na equação. O número de Weber é a relação entre as forças de inércia (V) e as forças de tensão superficial (σ). Analisando-se a expressão acima, verifica-se que a igualdade de todos os grupos adimensionais entre dois escoamentos

geometricamente semelhantes só é possível para a escala geométrica unitária, pois essa igualdade implica que todas as outras grandezas devem ser proporcionais à escala geométrica. Esta condição é, de modo geral, impossível de ser atendida numa outra escala diferente da unitária. A relação de semelhança modelo-protótipo utilizada nos modelos reduzidos é obtida através da igualdade do número de Froude do modelo e do protótipo provocando a desigualdade dos outros grupos adimensionais. Entretanto, alguns autores consideram que, dentro de alguns critérios, pode ser feita a representação sem ocasionar efeitos de escala significativos.

O estudo de Anwar et al. (1978) contemplou o comportamento do parâmetro da circulação $\Gamma D/Q$ em função do número de Reynolds para diversos valores de s/D (Fig. 4.8), indicando que a relação $\Gamma D/Q$ torna-se menos dependente quando $Re > 3 \times 10^4$.

Fig. 4.8 - Variação do Parâmetro de circulação $\Gamma D/Q$ em função do número de Reynolds. (Anwar et al., 1978)

Alguns pesquisadores para compensar o efeito da dissipação de energia em modelos reduzidos que provoca a diminuição da intensidade do vórtice propõem o aumento da vazão da estrutura e, consequentemente, da velocidade do escoamento na região de aproximação. Desta forma alguns pesquisadores acreditam que são atingidos melhores resultados. Denny apud Raju (1978) propõe que a velocidade no modelo deve ser igual à velocidade no protótipo sugerindo o conceito de *igual velocidade*. No mesmo estudo, Hatterley e Iversen afirmam baseados em estudos na região de sucção de uma bomba, que é necessário o aumento da velocidade acima da requerida pela semelhança de Froude para a representação dos vórtices.

É importante ressaltar que qualquer alteração na velocidade não atendendo a razão de semelhança de Froude implica na desigualdade do número de Froude na região de aproximação, com possíveis alterações da configuração do escoamento. Existem outras formas de avaliar a influência da viscosidade na intensidade do vórtice em modelo reduzido sem a alteração do número de Froude, como a construção de modelos com escalas diferentes, a alteração da viscosidade ou a variação da temperatura do fluido.

O comportamento do parâmetro da circulação $\Gamma D/Q$ em função do número de Weber $We = \rho Q^2 s/A_c^2 \sigma$ para diversos valores de s/D (Fig. 4.9) mostra que o intervalo de influência do valor de We sobre o parâmetro da circulação é menor com a diminuição da relação s/D e que para elevados valores de We a variação de $\Gamma D/Q$ é menor. É importante ressaltar que a variação do número de Weber apresentada na Fig. 4.9 foi conseguida através da variação de velocidade do escoamento alterando outros parâmetros adimensionais. Em decorrência deste fato, as conclusões de Anwar et al. (1978) indicam somente que vórtices com arraste de ar não são afetados pela tensão superficial e viscosidade, quando o número de Weber e o número de Reynolds são elevados.

Fig. 4.9 - Variação do Parâmetro de circulação $\Gamma D/Q$ em função do número de Weber (Anwar et al., 1978)

Daggett e Zielinski et al apud Anwar et al. (1978) utilizando água, mistura de água-glicerina e vários tipos de óleos como fluido para avaliar a formação de vórtices numa embocadura disposta horizontalmente afirmam que a viscosidade e a tensão superficial não afetam o desenvolvimento de vórtice com arraste de ar para $Re > 3 \times 10^4$ e $We > 10^4$.

A influência da tensão superficial sobre o vórtice é mais acentuada quando existe uma curvatura na superfície da água. A relação entre o número de Weber no modelo e no protótipo é a raiz quadrada da escala (semelhança de Froude), então $We_{\text{modelo}} \ll We_{\text{protótipo}}$. Para $We_{\text{modelo}} \gg 1$ a força de inércia é maior que a força de tensão superficial indicando que os *efeitos de escala* podem ser desprezáveis a partir de um determinado valor. É importante observar que as linhas da Fig. 4.9 para valores de $We > 10^4$ e da Fig. 4.8 para valores de $Re > 3 \times 10^4$ ainda possuem declividades elevadas para algumas relações de s/D indicando variação significativa

do parâmetro da circulação e possibilidade da influência dos *efeitos de escala*, mesmo para estudos realizados com o número de Weber e o número de Reynolds acima destes valores.

4.4. Classificação dos Vórtices

Segundo Hecker (1978) a maneira mais simples de determinar a intensidade dos vórtices é através da observação visual classificando-os em diversos tipos, conforme a Tab. 4.1.

Tab. 4.1 - Classificação dos tipos de vórtice

Tipo de Vórtice	Descrição
1	Rotação superficial
2	Depressão superficial
3	Núcleo do vórtice visível com o auxílio de corante
4	Arraste de partículas flutuantes
5	Arraste de bolhas de ar
6	Núcleo de ar completamente desenvolvido

Aoki (1986) representou esquematicamente os tipos de vórtice apresentados acima para a comparação modelo-protótipo.

Fig. 4.10 - Representação esquemática dos tipos de vórtice (Aoki, 1986)

Esta classificação pode variar em função da subjetividade do método e que, caso necessário, pode ser elaborada uma classificação mais detalhada abrangendo outros tipos de vórtice. No mesmo trabalho Hecker apresenta a Fig. 4.11 que relaciona o tipo de vórtice T em função da profundidade relativa z/s e o número de Froude na forma de gráfico. O quadrado do número de Froude é a relação entre a máxima velocidade tangencial v_{mt}^2 sobre a profundidade total s e aceleração da gravidade g , representado através da seguinte expressão:

$$Fr^2 = \frac{v_{mt}^2}{g \cdot s} \quad \text{Eq. 4.6}$$

Fig. 4.11 - Classificação do tipo de vórtice em relação à profundidade relativa e do número de Froude (Durgin e Hecker, 1978)

As observações de vórtices em modelos reduzidos podem apresentar dificuldades de interpretações em razão das relações de semelhança prejudicando a correlação com o protótipo. Os observadores em campo têm a tendência natural de afirmar que os vórtices no protótipo são maiores e mais intensos em virtude da elevada turbulência e do ruído, o que não ocorre em modelos reduzidos. A diferença em função da relação de tempos para o modelo baseado na escala de semelhança de Froude faz com que no protótipo o vórtice dê a impressão de ser mais persistente. Hecker (1981) apresenta outros fatores que podem contribuir para a diferença entre modelo e protótipo em relação à atividade vorticiosa.

1. Atenção insuficiente na topografia da região de aproximação e na rugosidade da superfície do modelo.
2. Efeito de escala devido à viscosidade em dispositivos acessórios como painéis, pilares e dispositivos antivórtice.
3. Reprodução inadequada de detalhes de topografia.
4. Correntes induzidas pelo vento.
5. Estratificação do reservatório em função da diferença de temperatura.

Além da intensidade, a duração do vórtice é uma variável importante observando-se que durante os estudos em modelos reduzidos a maioria são intermitentes. A avaliação contínua do tipo de vórtice ajuda a definir a frequência de cada tipo, além de verificar a ocorrência quando de pequena duração e de forte intensidade, difíceis de serem detectados caso a observação não seja contínua. A Fig. 4.12 a seguir mostra o resultado de uma observação dos tipos de vórtices ao longo do tempo para possibilitar a análise posterior.

Fig. 4.12 - Registro contínuo dos tipos de vórtice
(Durgin e Hecker, 1978)

4.5. Proteção Contra a Formação de Vórtices

A ocorrência de vórtices seja num reservatório de sucção de bombas, tomada d'água de uma usina hidrelétrica ou eclusa e na região a montante das comportas de um vertedor é prejudicial ao funcionamento do equipamento ou da estrutura provocando perda significativa de eficiência, podendo até agravar outros fenômenos como, por exemplo, a cavitação no rotor de bombas. Quando o problema é detectado após a finalização da obra, alterações na forma das estruturas com o objetivo de modificar as condições de aproximação e de convergência do fluxo à embocadura são, em geral, muito custosas e podem não resolver o problema, caso as fontes geradoras de vorticidade não sejam adequadamente identificadas e suprimidas.

Segundo Aoki (1986) quando o problema é detectado na fase pós-obra as providências a serem tomadas se dividem em duas formas: a obstrução da livre rotação no *corpo d'água* nas proximidades da embocadura e o afastamento do núcleo do vórtice para longe da embocadura. No mesmo trabalho são apresentados dispositivos antivórtices propostos por Denny e Young, conforme mostra a Fig. 4.13.

Fig. 4.13 - Dispositivos antivórtice propostos por Denny e Young apud Aoki (1986)

Segundo Levi (1991), o ponto de início de formação do vórtice encontra-se abaixo da superfície, na zona de convergência do escoamento, e não na superfície livre da água. É importante observar que os dispositivos antivórtice que atuam somente na superfície livre da água podem, eventualmente, evitar o arraste de ar em vórtices. Contudo, na região abaixo da superfície onde se origina a formação do vórtice o escoamento pode continuar apresentando uma tendência convergente e rotacional provocando perdas de carga na entrada da estrutura e adicionais ao longo do conduto forçado, além do comportamento irregular da lâmina líquida caso o escoamento à jusante ocorra em superfície livre.

5. O MODELO FÍSICO

5.1. Considerações Iniciais

O modelo físico reduzido tridimensional foi construído no Centro Tecnológico de Hidráulica. Os ensaios foram realizados para verificar o comportamento dos órgãos que compõem o Aproveitamento Hidrelétrico Ponte de Pedra (tomada d'água, estrutura de desvio, casa de força e vertedor). Em virtude do comportamento atípico do escoamento na região do vertedor, com ocorrência de fortes descolamentos junto aos muros e pilares decorrentes da formação de vórtices, quando da operação com abertura parcial de comportas, foi decidido utilizar a estrutura já existente com o objetivo de realizar a parte experimental desta dissertação.

5.2. Descrição do Modelo Físico

O modelo físico foi construído atendendo a semelhança de Froude na escala 1:50. O perfil do vertedor é semelhante a do tipo WES construído em acrílico com tomadas de pressão ao longo do perfil, dimensionado para uma carga de projeto $H_d=8,0\text{m}^1$ e possui três vãos de 6,0m cada. Os vãos são controlados por comportas tipo segmento, com muros e pilares de madeira possuindo ranhuras próximas à crista para a colocação de comportas tipo *stoplog*. Os bordos de ataque dos pilares e muros são removíveis e permitem a alteração, quando necessário. As Fig. 5.1 e Fig. 5.2 mostram a delimitação da área do modelo e os detalhes da forma geométrica do perfil do vertedor, respectivamente. A Foto 1² mostra a região de aproximação ao vertedor após a conclusão da fase de construção do modelo.

¹ As medidas são fornecidas em metros do protótipo.

² As fotos são apresentadas no anexo.

Fig. 5.1 - Delimitação do modelo reduzido

Fig. 5.2 - Forma geométrica do perfil do vertedor

A alimentação do modelo é realizada através de um reservatório de nível constante, alimentada por um conjunto motor-bomba constituindo um circuito fechado. A medição de vazão é feita através de um vertedor retangular, previamente aferido. Os níveis d'água são medidos com ponta limnimétrica com precisão de 0,1mm. As pressões médias são medidas por meio de piezômetros instalados no alinhamento do eixo do vertedor, com menor espaçamento na região entre o paramento de montante e a crista.

O vertedor possui as seguintes características:

- $H_d = 8,0 \text{ m}$ (carga de projeto)
- $Q_{\text{máx}} = 1040 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão máxima prevista)
- $Q_d = 800 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão de projeto)
- $L_{\text{vert}} = 23,0 \text{ m}$ (largura do vertedor)
- $N^\circ \text{ de vãos} = 3$
- $N^\circ \text{ de pilares} = 2$
- Espessura do pilar = 2,5m

5.3. Procedimentos Experimentais

Com o objetivo de verificar o comportamento do vertedor e melhorias nas condições de escoamento foram realizados alguns estudos. A possibilidade de ocorrência de pressões negativas significativas foi verificada através de medições de pressões ao longo do perfil com abertura total e parcial de comportas. A instabilidade do escoamento com ocorrências frequentes de descolamentos junto aos muros e pilares em função do aparecimento de vórtices, exigiu uma série de modificações nos elementos do vertedor e na região de aproximação, descritas a seguir: alterações na forma geométrica dos muros de aproximação, implantação de espigões na região de aproximação ao vertedor, mudança no posicionamento do eixo das comportas e a implantação de estruturas antivórtice.

a) Medições de pressões no vertedor

As medições das pressões médias atuantes na soleira do vertedor foram realizadas para as vazões de 292, 550, 750 e 1040 m³/s. Para as vazões de 292, 550 e 750 m³/s foram realizadas medições com as três comportas abertas igualmente e para a vazão de 1040 m³/s com abertura total. Na Fig. 5.3 estão indicados os pontos de medição de pressão.

Fig. 5.3 - Pontos de medição de pressão

b) Alterações na forma geométrica dos muros de aproximação

Para verificar qualitativamente a influência da forma geométrica dos muros de aproximação nas condições de convergência do escoamento ao vertedor, foram realizadas modificações no comprimento dos muros tornando-os mais longos. A Fig. 5.4 mostra a evolução da forma dos muros de aproximação.

Fig. 5.4 - Forma geométrica dos muros de aproximação

c) Implantação de espigões na região de aproximação ao vertedor

Para evitar o escoamento transversal ao eixo do vertedor e descolamentos junto aos muros e pilares foi avaliada, qualitativamente, a influência da implantação de espigões posicionados junto às margens do vertedor.

Fig. 5.5 - Configuração da região de aproximação ao vertedor com a presença de espigão junto às margens

d) Mudança no posicionamento do eixo das comportas e implantação de estruturas antivórtice

Uma experiência foi a de interferir na posição do eixo das comportas fixando-as em posição mais elevadas, cujo objetivo foi diminuir a distância entre a face de montante da comporta e a face do pilar evitando a formação de vórtices na *zona morta* existente a montante da comporta. O tipo de vórtice formado a montante da comporta foi observado para a comparação dos resultados. A implantação de estruturas antivórtice imersas 1,0m a partir do NA máximo normal foi feita utilizando as ranhuras e painéis tipo *stoplog*, permitindo a remoção quando da necessidade da passagem da vazão máxima de projeto.

Fig. 5.6 - Desenho esquemático indicando a mudança do eixo das comportas e o posicionamento das estruturas antivórtice

5.4. Resultados Experimentais

a) Medições de pressões no vertedor

Os resultados das medições de pressões médias são apresentados na Tab. 5.1. É possível perceber que não ocorrem pressões negativas significativas ($p/\gamma < -4,0\text{m}$) capazes de provocar problemas de cavitação no perfil do vertedor. As medições de pressões para as vazões de 292, 550, 750m³/s apresentam valores positivos elevados até a tomada de pressão T4 em função da abertura parcial da comporta. A Fig. 5.7 apresenta a distribuição de pressões ao longo da soleira do vertedor para a vazão de 1040m³/s, $H_e / H_d = 1,3$ e curvas de pressões apresentadas pelo manual Hydraulic Design Criteria – HDC medidas na linha central do vão entre pilares.

Tab. 5.1 - Resultados experimentais de medições de pressões na soleira do vertedor

Tomada	Pressão (m)			
	Q=292m ³ /s	Q=550m ³ /s	Q=750m ³ /s	Q=1040m ³ /s
T1	8,32	7,13	6,97	5,57
T 2	7,02	5,27	4,63	2,72
T 3	5,77	3,88	3,27	1,32
T 4	1,40	1,65	1,05	-0,20
T 5	0,02	0,22	0,27	0,07
T 6	-0,38	-0,48	-0,43	-0,13
T 7	-0,03	0,13	0,42	1,38

Fig. 5.7 - Distribuição de pressões ao longo do vertedor

b) Alteração da forma dos muros de aproximação

Houve melhora pouco significativa em relação à formação de vórtice para aberturas parciais de comportas em relação as três formas geométricas de muros de aproximação. O muro da alternativa 1 apresentou melhor convergência do escoamento para a vazão máxima com abertura total de comportas e foi adotado como solução final. As Foto 2, Foto 3 e Foto 4 mostram o escoamento junto às comportas para cada alternativa de muro de aproximação.

c) Implantação de espigões na região de aproximação ao vertedor

A implantação de espigões na região de aproximação ao vertedor melhorou as condições de aproximação à estrutura diminuindo a intensidade dos vórtices e, consequentemente, a instabilidade do escoamento a jusante das comportas. Porém, a melhoria foi classificada como insatisfatória considerando o custo-benefício da implantação dos espigões. As Foto 5 e Foto 6 mostram a operação do vertedor após a implantação de espigões de diferentes comprimentos na região de aproximação.

d) Mudança no posicionamento do eixo das comportas e implantação das estruturas antivórtice

Os resultados mostraram que a mudança de posição do eixo das comportas contribuiu para a diminuição da frequência e intensidade dos vórtices, mas a avaliação geral foi considerada insatisfatória em decorrência de descolamentos do escoamento junto aos muros e pilares durante a operação do vertedor. As Foto 7 e Foto 8 mostram, respectivamente, a operação do vertedor para $Q=550\text{m}^3/\text{s}$ com o eixo das comportas na posição original de projeto e na posição mais elevada (alternativa 01a) indicada na Fig. 5.6.

A implantação das estruturas antivórtice ocasionou melhora significativa, reduzindo as instabilidades porque não permite a rotação superficial do escoamento e o arraste de ar junto ao núcleo do vórtice. Estas estruturas foram recomendadas como solução viável, porém é importante ressaltar que as instabilidades e descolamentos da lâmina líquida não foram totalmente suprimidos em decorrência da formação de vórtices no interior da massa d'água abaixo da superfície. As Foto 9 e Foto 10 mostram, respectivamente, o comportamento do escoamento para $Q=850\text{m}^3/\text{s}$ com o eixo das comportas na posição original operando com e sem a presença das estruturas antivórtice.

6. CONCLUSÕES

Os diversos assuntos abordados mostraram que o desempenho do vertedor é influenciado pelas dimensões, formas geométricas e a disposição dos diferentes elementos que fazem parte da estrutura, além da configuração da região de aproximação. A análise individualizada da influência de cada elemento fornece subsídios que permitem delinear o comportamento da estrutura e em muitos casos sem a necessidade de estudos em modelos reduzidos.

A seguir são apresentadas as considerações finais do trabalho divididas por assunto.

Vertedores de soleira livre

O assunto escoamento sobre um vertedor de soleira livre é amplamente explorado até os dias de hoje. A metodologia de desenvolvimento de formas geométricas adequadas para vertedores, desde os primeiros estudos é baseada primordialmente na experimentação para atendimento das necessidades de construção deste tipo de obra e posterior elaboração de opiniões sistematizadas.

Os estudos de perfis vertentes baseados na forma da face inferior da lâmina líquida sobre um vertedor soleira delgada iniciado por Bazin e aperfeiçoado por Creager e Scimemi, apresentaram formas geométricas de perfis vertentes satisfatórias, com distribuição de pressões próximas da atmosférica da crista para jusante.

A proposta de Abecasis de adicionar um terceiro arco de circunferência para realizar a concordância entre o paramento de montante e a crista para os perfis com paramento de montante vertical proposto pelo USBR foi fundamental para eliminar picos de pressão negativa nesta região e conferir confiabilidade e a difusão do uso desta forma geométrica.

O estudo realizado por Maynard com a forma geométrica de elipse entre o paramento de montante e a crista mostrou-se bastante completo e com resultados convincentes. A melhoria observada em relação aos perfis do tipo WES e USBR é a distribuição de pressões ao longo da soleira com ausência de picos de pressões negativas na região a montante da crista, principalmente quando da inclinação do paramento de montante, ao menos para o valor de 1H:1V apresentado nos estudos.

A utilização do perfil lemniscata apresenta como vantagem o desenvolvimento contínuo de sua curvatura e a determinação das características matemáticas ao longo de sua extensão. A distribuição de pressões para a carga de projeto apresentou-se com valores pouco acima do perfil tipo Creager desde o paramento de montante até pontos de medição localizados a jusante da crista. A distribuição de pressões nesta região é fundamental na determinação da capacidade de descarga de um vertedor. A proposta do autor de alterar a forma geométrica a montante da crista poderá melhorar a eficiência do vertedor tornando o desempenho semelhante ao do perfil tipo Creager.

A possibilidade de alterações das características geométricas do vertedor e da região de aproximação, além do conhecimento dos níveis d'água de operação exige a análise detalhada da influência destas peculiaridades para diagnosticar o comportamento do conjunto.

Nos trabalhos consultados sobre o assunto coeficiente de contração do pilar foram encontrados somente resultados para as formas geométricas propostas pelo WES. Outros estudos são importantes para a busca de novas formas geométricas mais eficientes. O estudo em modelo reduzido tridimensional permite identificar a direção preferencial do escoamento quando a região de aproximação ao vertedor é muito irregular, permitindo simular alterações nesta região para direcionar o escoamento e minimizar os efeitos de contração dos pilares e muros de aproximação.

Escoamento sob comportas

A capacidade de descarga do escoamento sob comporta é de difícil determinação analítica considerando o escoamento tridimensional sobre a soleira de um vertedor. O coeficiente de vazão é influenciado por uma série de elementos como a forma da comporta, a carga a montante, perdas de carga do escoamento, inclinação da comporta, contrações verticais e laterais do escoamento e ocorrências de pressões negativas a jusante da comporta junto à soleira.

O estudo experimental em modelo reduzido de escoamento sob comportas merece atenção em relação a perdas de carga em função da viscosidade, é importante garantir um valor mínimo do número de Reynolds a partir do qual os valores do coeficiente de vazão não sejam influenciados pela viscosidade. O efeito da tensão superficial pode elevar o coeficiente de contração para aberturas pequenas de comportas e superestimar a capacidade de descarga conforme o estudo apresentado por Nago (1983).

A hipótese de convergência dos vetores velocidade e a utilização da abertura real da comporta representam um equacionamento mais representativo do comportamento do escoamento para aberturas parciais de comportas. Em função da diversidade de arranjos dos diferentes elementos do vertedor como a posição da comporta em relação ao perfil, formas e comprimentos de muros e pilares responsáveis pela contração lateral do escoamento, além de características do escoamento como a velocidade de aproximação, exigem estudos mais detalhados antes da aplicação sistemática do método.

O posicionamento do batente da comporta em relação a crista do perfil influencia na localização e intensidade das pressões negativas a jusante das comportas, podendo atingir valores preocupantes dependendo da carga de operação a montante. No estudo realizado por Lemos (1981), é verificado uma tendência de diminuição dos valores das pressões negativas com o deslocamento do batente da comporta para jusante.

Estudo sobre Vórtices

O fenômeno de formação de vórtice é um assunto complexo e de difícil modelação física ou experimental e matemática. A dificuldade se apresenta em função da tridimensionalidade e irregularidade do fenômeno, além da dificuldade na definição das grandezas relevantes a sua modelação.

A investigação experimental apresenta como principal dificuldade a avaliação da influência dos efeitos de redução da escala. A linha de raciocínio de muitos pesquisadores é a de estabelecer valores mínimos dos números de Reynolds e Weber para que os efeitos de viscosidade e tensão superficial sejam desprezáveis. A divergência de opiniões nos trabalhos consultados sobre a definição dos valores mínimos e a metodologia utilizada para avaliar a variação dos parâmetros adimensionais não permitem uma conclusão definitiva sobre o assunto.

A igualdade do número de Froude nos estudos em modelos reduzidos faz com que o fenômeno ocorra mais rapidamente e dê a impressão de ser intermitente, dificultando as medições de velocidade e intensidade, que melhor poderiam caracterizar o seu comportamento. A conclusão mais simples para minimizar os efeitos de escala respeitando a semelhança de Froude é a construção de modelo com escalas grandes.

As fontes de vorticidade citadas no texto muitas vezes fazem parte do projeto da estrutura hidráulica e são limitadas quanto às modificações de sua forma e dimensões. Nestes casos, a adoção de estruturas antivórtice pode representar uma solução menos custosa, porém nem sempre são elegantes.

Estudos experimentais

A distribuição de pressões no perfil do vertedor para a região a montante da crista apresentou valores acima dos indicados pelo manual da WES. A causa desta

diferença pode ser em função das dimensões adotadas no perfil com raios de concordância maiores que os estabelecidos pelo manual, tornando a região da soleira a montante da crista mais volumosa. Os valores de pressões a jusante da crista se apresentaram próximos da pressão atmosférica com elevação no final do perfil evidenciando a presença da curva de concordância com a calha de declividade elevada - *rápido*.

A adoção das estruturas antivórtice inibiu a formação de vórtices com arraste de ar, porém não elimina o escoamento vorticoso que ocorre abaixo da superfície. Uma solução que se apresentou satisfatória em modelo reduzido foi a implantação das estruturas antivórtice associada a uma regra de manobras de comportas, alterando as condições de escoamento nas proximidades do vertedor minimizando a ocorrência de vórtices.

ANEXO

Foto 1 - Região de aproximação ao vertedor visto de montante para jusante.

Foto 2 - Muros de aproximação – Alternativa original

Foto 3 - Muros de aproximação - Alternativa 01

Foto 4 - Muros de aproximação - Alternativa 02

Foto 5 - Região de aproximação ao vertedor com a implantação de espigões

Foto 6 - Região de aproximação ao vertedor com a implantação de espigões de crista mais extensa.

Foto 7 - Operação com o eixo das comportas na posição original de projeto
 $Q=550\text{m}^3/\text{s}$

Foto 8 - Operação com o eixo das comportas na posição alternativa 01a
 $Q=550\text{m}^3/\text{s}$

Foto 9 - Operação do vertedor para $Q=850\text{m}^3/\text{s}$

Foto 10 - Operação do vertedor com a implantação das estruturas antivórtice
 $Q=850\text{m}^3/\text{s}$

LISTA DE REFERÊNCIAS

ANWAR, H. O.; WELLER, J. A.; AMPHLETT, M. B. **Similarity of free-Vortex at horizontal Intake**. Journal of the Hydraulic Research, IARH, 1978, pp. 95-105.

ABECASIS, F. M. M. **Soleiras descarregadoras. Alguns problemas especiais**. Dissertação apresentada ao LNEC. LNEC, Memória nº 175, Lisboa, 1961. 110p.

AOKI, C. M. **Estudo da formação de vórtices em tomadas d'água**. 1986. 149p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

_____. **Condições de semelhança na formação de vórtices em tomadas d'água**. São Paulo: Boletim Técnico DAEE, v.5, n.2, p131-156, 1981.

CHOW, V. T. **Open Channel Hydraulics**. Tokyo: McGraw-Hill, 1959. 680p.

CLEMMENS, A. J.; STRELKOFF, M.; REPLOGLE, J. A. **Calibration of Submerged Radial Gates**. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 129, Nº 9, Sep. 2003, pp. 680-687.

CREAGER, W. P.; JUSTIN, J. D. **Hydroelectric Handbook**. 2ed. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1950.

CUOMO, A. R. **Introdução ao estudo da semelhança de vórtice nas embocaduras**. Boletim Técnico DAEE, v.4, n.2, pp.175-191, 1981. São Paulo.

DURGIN, W.W.; HECKER, G.E. **The Modeling of Vortices at Intake Structures. Joint Symposium on Design and Operation of Fluid Machinery**. ASCE/ASME/IAHR. Colorado State University, 1978.

Estados Unidos. **Hydraulic Design Criteria** U. S. UNITED STATES ARMY ENGINEER. Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory Series. Vicksburg, Miss., 1988.

Estados Unidos. **Diseño de Presas Pequeñas**. BUREAU OF RECLAMATION. 3.ed. 1966. 639p.

FOX, R. W.; MCDONALD, A. T. **Introduction to Mechanics of Fluids**. 3.ed. New York, 1987.

HECKER, G.E. **Model-Prototype Comparison of Free Surface Vortices**. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 107, N° HY10, Oct. 1981, pp. 1243-1259.

KANASHIRO, W. H. **Vertedor com Perfil Tipo Lemniscata**. 1989. 139p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

LE MOS, F. O. **Directivas para a Colocação de Comportas nos Descarregadores das Barragens**. Lisboa: LNEC, Memória 469, 1975, 18p.

_____. **Critérios para o Dimensionamento Hidráulico de Barragens Descarregadoras**. Lisboa: LNEC, Memória 556, 1981, 57p.

LENCASTRE, A. **Hidráulica Geral**. Edição Luso-Brasileira, 1983.

LEVI, E. **Experiments on Unstable Vortices**. Journal of the Mechanics Division, ASCE, June 1972, pp. 539-559.

_____. **Vortices in Hydraulics**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol 117, N° 4, April 1991, pp. 399-412.

MAYNORD, S. T. **General Spillway Investigation**. Technical Report. United States Army Engineer Waterways Experiment Station Hydraulics Laboratory Series, Vicksburg, Miss., HL-85-1, Mar. 1985.

MIH, W. C.; HITE JR., J. E. **Velocity of Air-Core Vortices at Hydraulic Intakes**. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 120, Mar. 1994, pp. 284-297.

NAGO, H. **Discharge Coefficient of Underflow Gate in Open Channel.** Japan., Okayama University, 1983.

PIMENTA, C. F. **Curso de Hidráulica Geral.** 3.ed. 1977. São Paulo. v1.

_____. **Curso de Hidráulica Geral.** 4.ed. 1981. São Paulo. v2.

PINTO, D. P. **Modelo Simplificado de Escoamento sob Comportas.** 1992. 177p. Dissertação (mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

PORTO, R. M. **Hidráulica básica.** São Carlos: EESC-USP, 1998. 540p.

RANGA, K. G. R.; JAIN, A. K.; GARDE, R.J. **Vortex Formation at Vertical Pipe Intakes.** Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Nº HY10, Oct. 1981, pp. 1429-1445.

ROUSE, H. **Engineering Hydraulics.** New York: John Wily & Sons, 1949.