ALISSON GOMES DE MORAES

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM
MODELO CONCEITUAL DE AERAÇÃO EM
VERTEDORES**

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

São Paulo

2007

ALISSON GOMES DE MORAES

**DESENVOLVIMENTO E VALIDAÇÃO DE UM
MODELO CONCEITUAL DE AERAÇÃO EM
VERTEDORES**

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. Podalyro Amaral de Souza

São Paulo

2007

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência do seu orientador.

São Paulo, 31 de maio de 2007

Assinatura do Autor: _____

Assinatura do orientador: _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Moraes, Alisson Gomes de

**Desenvolvimento e validação de um modelo conceitual de
aeração em vertedores / A.G. de Moraes. – ed.rev.-- São Paulo,
2007.**

111 p.

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

**1.Aeração 2.Cavitação 3.Vertedores 4.Modelos matemáticos
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia Hidráulica e Sanitária II.t.**

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Podalyro Amaral de Souza pela orientação, dedicação e oportunidade de aprendizado, com grande contribuição para o meu aprimoramento intelectual e pessoal.

Ao Prof. Dr. Kikuo Tamada pelo apoio e valiosas dicas para o desenvolvimento deste trabalho e pelos valiosos conhecimentos repassados quando da minha passagem pelo CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH.

Ao Dr. Delduque Palma Pinto pelos valiosos conhecimentos repassados quando da minha passagem pelo CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH e orientação quando da minha graduação em engenharia.

À Nivalda e toda equipe da biblioteca do CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA – CTH pela paciência e valiosa contribuição neste trabalho.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade de de realização do curso de mestrado.

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 na elaboração deste trabalho e decisiva contribuição no meu crescimento pessoal e profissional.

À Cia. De Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) pela contribuição e por me dispor o tempo necessário para a elaboração deste trabalho.

À Faculdade de Tecnologia de São Paulo (FATEC-UNESP) cuja a graduação me proporcionou chegar no estágio atual, tanto profissionalmente quanto pessoalmente.

“Não combata o problema, resolva-o”.

(George C. Marshall)

RESUMO

MORAES, Alisson Gomes de. **Desenvolvimento e validação de um modelo conceitual de aeração em vertedores**. 2007. 111 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

Esta dissertação trata da aeração induzida em vertedores com objetivo de mitigar os efeitos da cavitação sobre os mesmos. A análise bibliográfica do tema está calcada na introdução ao mecanismo da cavitação e no levantamento do estado da arte a partir dos trabalhos pioneiros, nos clássicos e nos recentes.

Com base nos princípios da física: Conservação de Massa e Primeira Lei da Termodinâmica, foi desenvolvido um modelo matemático para aeração induzida em vertedores. O modelo proposto, após ser analisado do ponto de vista de sua consistência, foi avaliado em comparações com resultados fornecidos por outros pesquisadores, obtidos através de modelos físicos reduzidos.

Os resultados obtidos pelo modelo matemático proposto correspondem a boas estimativas das grandezas envolvidas na aeração induzida em vertedores, o que credencia o modelo proposto como uma ferramenta apropriada para projetos de engenharia hidráulica e futuros desenvolvimentos científicos.

Palavras Chave: Aeração. Vertedores. Cavitação. Modelo Conceitual.

ABSTRACT

MORAES, Alisson Gomes de. **Development and validation of a conceptual model of aeration in spillways.** 2007. 111 f. Dissertation (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

This study address prompt aeration in spillways reaching to reduce the cavitation effects on them. References were based on introduction to cavitation machanism and, state of art survey, to leave on not only earlier studies, but also on classical and most recent ones.

Based on principles of Physics, such as Mass Conservation and the First Law of Thermodynamics, a mathematical model has been developed as an example of prompt aeration in spillways. After extensive consistency analyses the proposed model has been validated by comparing different results furnished by studies on physical reduced models by other researchers.

Results obtained from the mathematical model proposed here correspond to good estimates of greatneses involved in prompt aeration is spillways and that turns the proposed model into an adequate tool for Hydraulic Engineering projects and for future scientifics stydies.

Keywords: Aeration. Spillways. Cavitation. Conceptual Model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
3. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. INTRODUÇÃO AO MECANISMO DE CAVITAÇÃO.....	5
3.2. LEVANTAMENTO DO ESTADO DA ARTE	21
4. MODELAGEM.....	69
4.1. COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	69
4.2. IDENTIFICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DA FÍSICA	70
4.3. IDENTIFICAÇÃO DAS LEIS PARTICULARES	72
4.4. IDENTIFICAÇÃO DAS GRANDEZAS INTERVENIENTES.....	74
4.5. ADOÇÃO DE HIPÓTESES SIMPLIFICADORAS	76
4.6. DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO PROPRIAMENTE DITO	77
4.7. ANÁLISE DE CONSISTÊNCIA.....	85
4.8. VALIDAÇÃO PRELIMINAR DO MODELO.....	85
4.9. REFORMULAÇÃO DO MODELO	90
5. VALIDAÇÃO AMPLA DO MODELO.....	92
5.1. UHE PEDRA DO CAVALO	92
5.2. ENSAIOS – CARVALHO (1997).....	96

6. DISCUSSÃO	100
7. CONCLUSÕES.....	103
8. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	105
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.	FORÇAS INSTANTÂNEAS ATUANTES NA PAREDE DE UMA CAVIDADE ESFÉRICA. FONTE: JONSON (1963) <i>APPUD</i> GIKAS (1986).	10
FIGURA 2.	ANÁLISE DE UMA BOLHA DE GÁS E VAPOR NA CONDIÇÃO DE EQUILÍBRIO, SOB TEMPERATURA E MASSA DE GÁS CONSTANTE. FONTE: KAPP (1960) <i>APPUD</i> GIKAS (1986).	10
FIGURA 3.	FORMAÇÃO DO MICROJATO EM UMA BOLHA ADERIDA À UMA SUPERFÍCIE SÓLIDA. FONTE: GIBSON (1968) <i>APPUD</i> GIKAS (1986).	14
FIGURA 4.	ESQUEMA DO ESCOAMENTO REENTRANTE EM CAVIDADE DE GRANDES DIMENSÕES E DO COLAPSO DE BOLHAS EM MOVIMENTO COM O LÍQUIDO. FONTE: KNAPP (1970) <i>APPUD</i> GIKAS (1986).....	15
FIGURA 5.	SISTEMA DE AERAÇÃO DO VERTEDOR DA BARRAGEM DE HEART BUTTE. FONTE: PETERKA (1953).	23
FIGURA 6.	AERADOR PROPOSTO POR HICKOX. FONTE: CHOW (1959).....	25
FIGURA 7.	ESCOAMENTO SOBRE UM PERFIL, EM PROCESSO DE CAVITAÇÃO. FONTE: ABECASSIS (1961).....	27
FIGURA 8.	CORREÇÃO DO PERFIL PROPOSTA. FONTE: ABECASSIS (1961).....	28
FIGURA 9.	ENSAIO EM MODELO REDUZIDO DO VERTEDOR TULIPA DE ATIBAINHA. FONTE: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1).....	29
FIGURA 10.	AERADOR DO VERTEDOR DA BARRAGEM DE ATIBAINHA. FONTE: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1).....	30
FIGURA 11.	COMPARAÇÃO DA CURVA DE DESCARGA DO VERTEDOR TULIPA DA BARRAGEM DE ATIBAINHA OBTIDAS EM ENSAIO COM A CONFIGURAÇÃO DE PROJETO E COM AERADORES. FONTE DE DADOS: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1).	31

FIGURA 12.	COMPARAÇÃO DA CURVA DE DESCARGA DO VERTEDOR TULIPA DA BARRAGEM DE CACHOEIRA OBTIDAS EM ENSAIO COM A CONFIGURAÇÃO DE PROJETO E COM AERADORES. FONTE DE DADOS: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-2).	32
FIGURA 13.	ENSAIO DO VERTEDOR DA UHE PEDRA DO CAVALO, VIDE AERADORES. FONTE: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982).	34
FIGURA 14.	VÓRTICES EM CHUTE BLOCKS. FONTE: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1990).	35
FIGURA 15.	LINHAS EQUIPOTENCIAIS DE PRESSÃO SOBRE O PARAMENTO. FONTE: PINTO (1988).	37
FIGURA 16.	MODELO EXPERIMENTAL DE AERADOR EM LABORATÓRIO. FONTE PINTO (1988)	38
FIGURA 17.	TIPOS DE AERADORES MAIS UTILIZADOS. FONTE: PINTO (1988).	39
FIGURA 18.	FORMAS DE ADMISSÃO DE AR. FONTE: PINTO (1988).	40
FIGURA 19.	FUNÇÃO $q_a = f(q)$ MEDIDA EM FOZ DO AREIA. FONTE: PINTO (1988).	42
FIGURA 20.	DISTRIBUIÇÃO TÍPICA DE PRESSÕES SOB O JATO TRANSVERSALMENTE AO FLUXO. FONTE: PINTO (1988).	42
FIGURA 21.	DESEMPENHO DO AERADOR PARA DIVERSAS CONDIÇÕES DE ADMISSÃO DE AR. FONTE: PINTO (1988).	43
FIGURA 22.	ENTRADA DE AR NO AERADOR DA UHE PEDRA DO CAVALO. FONTE: SERRA (1986).	46
FIGURA 23.	SISTEMA DE AERAÇÃO DO VERTEDOR DA UHE PEDRA DO CAVALO. FONTE: SERRA (1986).	47
FIGURA 24.	PERDA DE CARGA NO VERTEDOR. FONTE CHANSON (1993).	61
FIGURA 25.	ESTÁGIOS DE AERAÇÃO EM VERTEDORES. FONTE CHANSON (1993).	62

FIGURA 26.	SEQÜÊNCIA FORMAÇÃO DE UMA BOLHA DE AR PELA QUEDA DE UMA GOTA D'ÁGUA. FONTE: TSUTIYA (1999).....	65
FIGURA 27.	DESENHO ESQUEMÁTICO DO AERADOR A SER MODELADO MATEMATICAMENTE.....	77
FIGURA 28.	COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DO MODELO MATEMÁTICO E DADOS DOS ENSAIOS	88
FIGURA 29.	COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DO MODELO MATEMÁTICO E DADOS DOS ENSAIOS	90
FIGURA 30.	COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DO MODELO MATEMÁTICO E DADOS DOS ENSAIOS DO AERADOR 1 – UHE PEDRA DO CAVALO.....	94
FIGURA 31.	COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DO MODELO MATEMÁTICO E DADOS DOS ENSAIOS DO AERADOR 2 – UHE PEDRA DO CAVALO.....	95
FIGURA 32.	GRÁFICO DE COMPARAÇÃO ENTRE β MEDIDO E CALCULADO DOS ENSAIOS DE CARVALHO (1997)	97

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.	C EM FUNÇÃO DE σ . FONTE CHOW (1959).....	25
TABELA 2.	CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO	86
TABELA 3.	CÁLCULO DA ESPESSURA DE ESCOAMENTO	86
TABELA 4.	CÁLCULO DE β COM 12 E 6 AERADORES ABERTOS	87
TABELA 5.	CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO	89
TABELA 6.	CÁLCULO DA ESPESSURA DE ESCOAMENTO	89
TABELA 7.	CÁLCULO DE β COM 12 E 8 AERADORES ABERTOS	89
TABELA 8.	CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO – UHE PEDRA DO CAVALO.....	93
TABELA 9.	CÁLCULO DE β - UHE PEDRA DO CAVALO.....	94
TABELA 10.	CÁLCULO DE β COM DADOS DE CARVALHO (1997).....	98

LISTA DE SÍMBOLOS

A	= Área da seção de controle.....	(m^2)
B	= Largura do canal.....	(m)
C	= Concentração de ar dissolvido no escoamento.....	$(-)$
C_a	= Coeficiente de vazão de ar do aerador.....	$(-)$
c	= Celeridade.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
D	= Diâmetro da tubulação de adução.....	(m)
d_p	= Diâmetro das bolhas de cavitação.....	(m)
Eu	= Número de Euler.....	$(-)$
e	= Energia por unidade de massa.....	$\left(\frac{m^2}{s^2}\right)$
e_0	= Espessura de lançamento do jato.....	(m)
Fr	= Número de Froude.....	$(-)$
f_a	= Fator de atrito da tubulação.....	$(-)$
g	= Aceleração gravitacional.....	$\left(\frac{m}{s^2}\right)$

H	= Espessura do escoamento na parte superior do aerador proposto por Hickox.....	(m)
H_{atm}	= Carga correspondente à pressão atmosférica local.....	(m)
H_j	= Carga a jusante.....	(m)
H_m	= Carga a montante.....	(m)
H_s	= Carga de sucção das bombas.....	(m)
H_T	= Carga manométrica efetiva da bomba.....	(m)
H_u	= Carga da lâmina d'água sobre a crista do vertedor.....	(m)
H_v	= Carga devida à pressão de vapor do líquido.....	(m)
h	= Espessura do escoamento no lançamento do jato.....	(m)
h_c	= Entalpia por unidade de massa.....	(m)
h_d	= Altura da defletor do aerador.....	(m)
h_r	= Altura relativa do lançamento do jato sobre o aerador.....	(m)
h_s	= Altura do degrau do aerador.....	(m)
i	= Declividade longitudinal do leito.....	(-)
j	= Declividade longitudinal da carga.....	(-)

K	= Coeficiente de Von Karman.....	(-)
K_{β}	Coeficiente de correção na fórmula de β	(-)
k	= Coeficiente de perda de carga localizada.....	(-)
k_a	= Coeficiente de entrada de ar no aerador.....	(-)
L_j	= Comprimento de lançamento do jato sobre o aerador.....	(m)
l	= Comprimento da tubulação de adução de ar.....	(m)
m	= Parâmetro geométrico empírico de correção.....	(-)
$\bar{N}$	= Constante para massa fixa de um gás numa bolha esférica.....	(-)
n	= Número de aeradores.....	(-)
n_e	= Parâmetro exponencial empírico de correção.....	(-)
p	= Pressão.....	(Pa)
p_a	= Pressão do ar.....	(Pa)
p_{atm}	= Pressão atmosférica.....	(Pa)
p_c	= Pressão na parede da cavidade.....	(Pa)
p_g	= Pressão parcial do gás no interior da cavidade.....	(Pa)
p_p	= Pressão do escoamento potencial.....	(Pa)

p_r = Pressão em um ponto à distância r (Pa)

p_w = Pressão de água..... (Pa)

p_v = Pressão de vapor..... (Pa)

p_∞ = Pressão nas vizinhanças da cavidade..... (Pa)

Q = Vazão do escoamento que entra na seção de controle..... $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

Q_a = Vazão de ar..... $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

Q_w = Vazão de água..... $\left(\frac{m^3}{s}\right)$

q_w = Vazão específica de água..... $\left(\frac{m^3}{s \times m}\right)$

q_a = Vazão específica de ar..... $\left(\frac{m^3}{s \times m}\right)$

R = Raio da cavidade no instante t genérico..... (m)

$\dot{R}$ = Raio adimensional da bolha de cavidade..... (-)

R_c = Raio crítico da cavidade..... (m)

R_0 = Raio da cavidade no instante $t=0$ (m)

r	= Distância radial calculada a partir do centro da cavidade.....	(m)
r_c	= Raio de curvatura no plano vertical do fundo do canal (positivo se côncavo).....	(m)
S	= Posição.....	(m)
S_0	= Posição inicial.....	(m)
S_b	= Submergência dos <i>Baffle Piers</i> sob o escoamento.....	(m)
S_c	= Superfície de controle.....	(m^2)
T	= Temperatura absoluta.....	(K)
t	= Tempo.....	(s)
t_c	= Intervalo de tempo necessário ao colapso completo da cavidade...	(s)
t_j	= Tempo de lançamento do jato.....	(s)
U	= Velocidade do escoamento na borda da camada limite.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
U_c	= Velocidade radial da parede da cavidade com raio R.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
u	= Energia interna por unidade de massa.....	$\left(\frac{m^2}{s^2}\right)$

u_c	= Velocidade radial do fluido à distância r.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
u_*	= Velocidade de atrito do escoamento.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
u_r	= Velocidade de surgimento das bolhas cavitantes.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
V_c	= Volume de controle.....	(m^3)
v	= Velocidade média do escoamento.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
v_0	= Velocidade inicial.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
v_w	= Velocidade média do escoamento de água.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
v'	= Velocidade mínima de aeração do escoamento.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
v_∞	= Velocidade nas vizinhanças da cavidade.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
$\vec{v}$	= Vetor velocidade.....	$\left(\frac{m}{s}\right)$
x	= Distância no plano horizontal a partir de um ponto de referência....	(m)
y	= Coordenada no plano vertical.....	(m)

y_H = Espessura do escoamento na parte inferior do aerador..... (m)

z = Distância no plano vertical a partir de um ponto de referência..... (m)

z_c = Corresponde a $\beta_c^3 = \left(\frac{R}{R_0}\right)^3$ (-)

α = Ângulo de lançamento do jato sobre o defletor..... (rad)

$\bar{\alpha}$ = Ângulo de lançamento relativo do jato sobre o defletor..... (rad)

β = Coeficiente de aeração $\left(\frac{Q_a}{Q}\right)$ (-)

$\beta_{\max}$ = Coeficiente máximo de aeração $\left(\frac{Q_a}{Q}\right)$ (-)

β_c = Função $\beta_c = \frac{R}{R_0}$ (-)

δ = Espessura da camada limite..... (m)

δQ = Variação do calor..... (J)

δW = Variação do trabalho..... (J)

ΔH_d = Perda de carga distribuída..... (m)

ΔH_l = Perda de carga localizada..... (m)

Δp = Diferença entre pressões..... (Pa)

Δp_a = Desvio entre p_p e p_g (Pa)

Δp_{in} = Componente de pressão devido à turbulência natural do escoamento..... (Pa)

Δp_{tr} = Componente de pressão devido à influência da rugosidade..... (Pa)

Δz = Altura do degrau do aerador..... (m)

θ = Ângulo de inclinação do canal..... (rad)

σ = Índice de cavitação..... (-)

σ_s = Tensão superficial da água..... $\left(\frac{N}{m}\right)$

μ = Viscosidade absoluta..... $\left(\frac{m^2}{s}\right)$

ρ = Massa específica do fluido..... $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

ρ_a = Massa específica do ar..... $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

ρ_w = Massa específica da água..... $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

λ_j = Distância relativa do jato percorrida sobre o aerador..... (-)

τ_0 = Tensão de atrito do escoamento..... (Pa)

1. INTRODUÇÃO

A água é um composto vital para a sobrevivência de todo e qualquer ser sobre a terra. Sua disposição sobre a superfície terrestre é muito distinta, sendo que grande parte está nos mares, onde se encontra nela diluído considerável percentual de cloreto de sódio (sal), o que a torna imprópria para o consumo da maioria das espécies existente sobre a terra, inclusive o homem.

A água existente sobre os continentes é de quantidade muito limitada e cíclica, variando em função das épocas do ano e de fenômenos climáticos como o *El Niño*. Fica logo evidente a necessidade de se fazer um estoque estratégico de água para os períodos de escassez. Com este objetivo foram criadas as barragens, cujo as primeiras datam de 3000 A.C., localizadas no Rio Nilo, segundo ROBERSON (1998). O crescimento populacional ocorrido após a Idade Moderna demandou uma necessidade maior de água e energia, tornando as barragens de fundamental importância, principalmente para o abastecimento público, irrigação e geração de eletricidade. Estas foram sendo construídas em tamanhos cada vez maiores, em rios de grandes vazões e com desníveis muito acentuados.

Mesmo as grandes barragens não têm condições de amortecer cheias com pequena probabilidade de ocorrência, tornando necessário o uso estruturas descarregadoras. Devido à força gravitacional, quanto mais acentuado for o desnível, maior a sua energia cinética que a água adquire ao chegar ao final da estrutura. Esta grande energia cinética atua de forma problemática, tanto a jusante da barragem, quanto à própria estrutura descarregadora.

Os danos causados pela grande energia cinética do escoamento podem ser catastróficos, como por exemplo, o colapso da barragem através da erosão

provocada em suas fundações. Os danos causados a jusante da estrutura descarregadora podem ser mitigados através da adoção de dissipadores de energia logo a jusante do descarregador, estes já amplamente estudados, existindo diversos tipos, adaptados para situações distintas. O aumento do porte das barragens, e conseqüentemente da vazão específica sobre os descarregadores, vem causando problemas de erosão nos mesmos. O estudo referente a estes problemas vêm evoluindo de acordo com a complexidade e tamanho das barragens construídas.

As erosões ocorridas nas estruturas descarregadoras são causadas pelo escoamento à grande velocidade que por elas passam. A velocidade do escoamento provoca queda na pressão, podendo causar cavitação sobre a estrutura. A cavitação é um fenômeno termodinâmico pouco desejável que ocorra nos descarregadores devido ao seu grande poder erosivo sobre materiais não cristalinos, como o concreto utilizado na confecção destas estruturas.

O poder erosivo da cavitação é muito preocupante nos extravasores, principalmente nos que têm grande vazão específica. Para mitigar os efeitos nocivos da cavitação, nos extravasores de muitas grandes barragens construídas nas ultimas décadas do século XX, foram implantados aeradores no paramento dos vertedores ou nas galerias. Após verificações em muitos protótipos, ficou comprovado que os aeradores são uma forma eficiente de mitigação dos efeitos da cavitação.

O desenvolvimento dos aeradores permite a construção de extravasores com vazões específicas maiores, conseqüentemente com menores dimensões. Extravasores com dimensões menores são desejáveis do ponto de vista econômico, tendo em vista o grande volume de concreto utilizado para a construção dos mesmos. Ao reduzir o custo de implantação das barragens, podem ser alocados

mais recursos para outras áreas prioritárias ou para construção de novas barragens, melhorando a qualidade de vida da população que depende das mesmas.

2. OBJETIVOS

Esta proposta têm como objetivos primários:

- Fazer levantamento do estado da arte.

O levantamento do estado da arte baseia-se em uma análise bibliográfica abrangente sobre o tema deste trabalho através de consulta a livros, periódicos e internet. Serão analisados os trabalhos precursores, colocaram o tema; os trabalhos relevantes, os quais deram as maiores contribuições no desenvolvimento dos aeradores; e os trabalhos mais recentes encontrados sobre o tema.

- Propor método de cálculo conceitual.

A proposta de método de cálculo conceitual tem como objetivo apresentar um modelo desenvolvido a partir dos princípios da Física, aplicando aos mesmos hipóteses simplificadoras, a fim de eliminar os termos cuja influência é desprezível no resultado.

- Fazer crítica ao método de cálculo conceitual proposto.

Após a elaboração do modelo conceitual, faz-se necessário comprovar sua adequação através de testes de consistência dos resultados obtidos e comparação do resultado do mesmo com protótipos e modelos físicos reduzidos, cujos dados encontram-se na literatura existente sobre o tema objeto deste trabalho.

3. ANÁLISE BIBLIOGRÁFICA

3.1. Introdução ao Mecanismo de Cavitação

A cavitação é um fenômeno termodinâmico onde a combinação entre pressão e temperatura é o principal causador. A consequência da cavitação é a formação de ondas de choque de alta pressão, na maioria dos casos, entre eles o objeto deste trabalho, é um fenômeno altamente indesejado. A cavitação pode ser útil em alguns casos, onde este princípio é utilizado para corte de sólidos e também para matar microorganismos por esmagamento em tratamento de água.

PORTO (2004) faz uma síntese do fenômeno voltada principalmente para sistemas de bombeamento, onde a cavitação causa deterioração dos equipamentos hidromecânicos e consequente redução da eficiência do sistema. Segundo o mesmo, a cavitação é um fenômeno sobre o qual não há consenso no meio científico quanto à explicação sobre o fenômeno.

Existem três explicações que concorrem entre si, segundo PORTO (2004), porém nenhuma é considerada como absoluta. A primeira descreve que *“a cavitação induz vibração à zonas mais extensas do metal, sendo então os esforços destrutivos oriundos de um fenômeno oscilatório, durante o qual o líquido é introduzido é expulso dos poros do material, dando origem à elevadas pressões internas”*. A segunda hipótese descreve que o aparecimento da corrosão química é causado pelo desprendimento do oxigênio liberado pelo líquido. Já a terceira hipótese descreve que *“as bolhas de vapor e a limalha erodida da superfície do material penetram nos poros do metal, afetando-o por vibrações e pressões oriundas do colapso”*.

GIKAS (1986), faz uma abordagem geral sobre cavitação, tendo enfoque para auxiliar futuras pesquisas, demonstrando com profundidade de detalhes os principais mecanismos até então conhecidos sobre cavitação. Os tópicos de 3.1.1 a 3.1.2, têm como referência esta bibliografia.

3.1.1. Fundamentos Teóricos

Estudos em hélices propulsoras de navios militares são relatados pelas bibliografias citadas por GIKAS (1986), datadas do final do século XIX, como os primeiros relatos sobre o fenômeno da cavitação. Este sendo um fenômeno pertinente à fase líquida dos materiais, tendo como consequência a formação de uma fase gasosa interagindo com a fase líquida, através de cavidades ou bolhas que surgem a partir de determinadas circunstâncias.

GIKAS (1986) define cavitação como: “a seqüência de eventos – crescimento e implosão de bolhas ou cavidades – desencadeada pela existência num líquido de um campo de pressões particular em cujo interior se atingem pressões suficientemente reduzidas”.

A classificação dos tipos de cavitação é motivo de discussão entre diversos autores, principalmente devido ao foco do estudo feito por cada um dos pesquisadores sobre o tema. Dentre as principais classificações, GIKAS (1986), destaca:

- Segundo o tipo de movimento que dá origem à cavitação;
- Segundo à maneira pela qual os núcleos ou cavidades presentes no escoamento se expandem e implodem;
- Tipos de cavitação que se apresentam em ensaios de hélices de navios;

- Cavitação afixada em perfis hidrodinâmicos;
- Cavitação que se apresenta a jusante de um cilindro circular;
- Cavitação gasosa e cavitação vaporosa.

Segundo Holl (1960) *appud* GIKAS (1986), a classificação entre cavitação gasosa e cavitação vaporosa é o tipo mais citado pelos pesquisadores. A primeira *“ocorre quando há expansão repentina de um bolha ou cavidade devido à vaporização do líquido existente junto às paredes da bolha; portanto, o conteúdo da bolha expandida seria basicamente de vapor do líquido”*. A segunda ocorre quando *“há expansão relativamente lenta de uma bolha ou cavidade de gás devido à difusão; pode ocorrer sob pressões superiores à pressão de vapor do líquido, o que não acontece com a cavitação vaporosa, na qual a pressão pode ser inferior à pressão de vapor”*.

O termo “supercavitação” é utilizado com frequência, segundo GIKAS (1986); este termo é utilizado quando a cavidade é desprendida da superfície onde a mesma é gerada. Através das forças do escoamento, a cavidade ou bolha, é empurrada para uma região a jusante, onde são notados os danos à superfície sólida.

Uma forma difundida de explicar o fenômeno da cavitação, segundo GIKAS (1986), é a ocorrência de núcleos de cavitação interagindo com o líquido em movimento. Estes núcleos seriam capturados por irregularidades no perímetro do escoamento ou em partículas em suspensão e, em condições propícias, seriam liberados, formando a cavitação.

A constituição destes núcleos tenta ser explicada através de duas linhas diferentes. A primeira, segundo GIKAS (1986) baseia-se *“no postulado da existência de buracos vazios no seio dos líquidos, de caráter permanente, sem nenhuma*

molécula em seu interior". Já a segunda, e mais recente, admite ser um fenômeno termodinâmico, o qual, através de flutuações térmicas randômicas, criariam vazios no interior do escoamento. Gases dissolvidos ou não dissolvidos e impurezas ou contaminantes em suspensão ou dissolvidos, segundo GIKAS (1986), podem ser considerados como núcleos de cavitação.

Lord Rayleigh, segundo GIKAS (1986), fez o primeiro postulado matemático sobre o comportamento de uma cavidade em colapso, admitindo as seguintes hipóteses:

- Cavidade esférica vazia situada no seio de líquido de extensão finita;
- Fluido incompressível;
- Desprezam-se os efeitos das propriedades do fluido, exceto a massa específica;
- Líquido em repouso longe da cavidade, onde a pressão tem valor finito e constante;
- Pressão nula na parede da cavidade;
- Escoamento somente radial em relação ao centro da cavidade.

Com base nestas hipóteses, elaborou o equacionamento com base em um balanço energético. Segundo GIKAS (1986), Lord Rayleigh teve como objetivo *"obter expressões da velocidade da parede da cavidade em função das condições de contorno estipuladas, do intervalo de tempo necessário à cavidade sofrer variação conhecida de raio, do intervalo de tempo necessário ao colapso completo e das pressões instantâneas em qualquer ponto da massa líquida"*. As expressões 1, 2, 3, e 4 são o resultado deste estudo.

$$u = U \frac{R^2}{r^2} \quad (1)$$

$$U^2 = \frac{2p_\infty}{3\rho} \left(\frac{R_0^3}{R^3} - 1 \right) \quad (2)$$

$$t = R_0 \sqrt{\frac{3\rho}{2p_\infty}} \int_{\beta}^1 \frac{\beta_c^{\frac{3}{2}}}{(1 - \beta_c^3)^{\frac{1}{2}}} d\beta_c \quad (3)$$

$$p = p_\infty \left[1 + \frac{R}{3r} (z_c - 4) - \frac{R^4}{3r^4} (z_c - 1) \right] \quad (4)$$

Onde:

p = Pressão em um ponto à distância r ;

p_∞ = Pressão nas vizinhanças da cavidade;

R = Raio da cavidade no instante t genérico;

R_0 = Raio da cavidade no instante $t=0$;

r = Distância radial calculada a partir do centro da cavidade;

t = Intervalo de tempo necessário ao colapso completo da cavidade;

U = Velocidade radial da parede da cavidade com raio R ;

u = Velocidade radial do fluido à distância r ;

z_c = Corresponde a $\beta_c^3 = \left(\frac{R}{R_0} \right)^3$;

β_c = Função $\beta_c = \frac{R}{R_0}$;

ρ = Massa específica do fluido.

Figura 1. Forças instantâneas atuantes na parede de uma cavidade esférica. Fonte: Jonson (1963) *appud* GIKAS (1986).

Figura 2. Análise de uma bolha de gás e vapor na condição de equilíbrio, sob temperatura e massa de gás constante. Fonte: Kapp (1960) *appud* GIKAS (1986).

O desenvolvimento de uma modelação matemática, com finalidade de analisar a estabilidade de uma bolha com gás e vapores, foi possível através do equacionamento do conteúdo gasoso e da tensão superficial do fluido. A partir das Equações de Navier-Stokes na forma particularizada da equação generalizada de Bernoulli para escoamento não permanente, segundo GIKAS (1986), podem ser deduzidos alguns equacionamentos relativos à estabilidade da cavidade, destacando-se o equacionamento do raio crítico (equação 5).

$$R_c = \sqrt{\frac{3\bar{N}T}{2\sigma_s}} \quad (5)$$

Onde:

$\bar{N}$ = Constante para massa fixa de um gás numa bolha esférica;

R_c = Raio crítico da cavidade;

T = Temperatura absoluta;

σ_s = Tensão superficial da água.

O equacionamento supra apresentado foi elaborado com base em hipóteses as quais não representam influência no resultado final, exceto a hipótese de se desprezar a viscosidade do fluido. Segundo GIKAS (1986) foi verificado que tanto a tensão superficial quanto a viscosidade de fluido têm grande influência sobre a taxa de crescimento da cavidade, tornando a mesma menor.

A fim de solucionar este erro conceitual, foi elaborado novo modelo matemático, também tomando como base as equações de Navier-Stokes. Fazendo-se as devidas deduções, foi possível chegar na equação 6, a qual é a equação geral de equilíbrio das cavidades, também conhecida como Rayleigh-Plesset.

$$R\dot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 = \frac{1}{\rho} \left(p_g + p_v - p_\infty - \frac{2\sigma_s}{R} - 4\mu \frac{\dot{R}}{R} \right) \quad (6)$$

Onde:

p_g = Pressão parcial do gás no interior da cavidade;

p_v = Pressão parcial do vapor de um fluido;

p_∞ = Pressão nas vizinhanças da cavidade;

R = Raio da cavidade no instante t genérico;

$\dot{R}$ = Raio adimensional da bolha de cavidade;

σ_s = Tensão superficial da água;

μ = Viscosidade absoluta;

ρ = Massa específica do fluido.

Segundo GIKAS (1986), a compressibilidade é outro fator que pode interferir na dinâmica de uma cavidade com gás. A fim de obter formulações que contemplassem a compressibilidade, foram admitidas as seguintes hipóteses:

- Movimento irrotacional;
- Líquido incompressível;
- Viscosidade e tensão superficial nulas (fluido perfeito);
- Cavidade isolada contendo gás em seu interior;
- Ausência de forças de campo;
- Velocidades desenvolvidas no líquido fora da bolha muito pequenas em relação à velocidade de propagação do som no líquido;
- Variação linear da massa específica com a pressão;

- Líquido em repouso ao longe, com pressão de valor finito.

Admitindo-se a existência de um potencial de velocidades que satisfizesse a equação acústica para ondas esféricas divergentes, Trilling segundo GIKAS (1986), desenvolveu uma equação geral do movimento. Posteriormente, foi melhorado o desenvolvimento deste equacionamento, resultando na equação 7, quando aplicada à parede da bolha.

$$\frac{3}{2}U^2\left(1 - \frac{5U}{3c}\right) + RU\left(1 - 2\frac{U}{c}\right)\frac{dU}{dR} = \frac{RU}{\rho c}\frac{dp}{R} + \left(1 + \frac{U}{c}\right)\frac{p - p_{\infty}}{\rho} \quad (7)$$

Onde:

- c = Celeridade;
- p = Pressão na parede da cavidade;
- p_{∞} = Pressão nas vizinhanças da cavidade;
- R = Raio da cavidade no instante t genérico;
- U = Velocidade da parede da cavidade no instante t ;
- ρ = Massa específica do fluido.

Segundo GIKAS (1986), a partir de estudos em túneis de água realizados por Gates e Billet, faz considerações sobre o desenvolvimento dos núcleos de cavitação a partir da contagem número de bolhas contadas em no fluido sob cavitação, classificando-as por seu diâmetro. Estes resultados, segundo o mesmo autor, indicam que “*núcleos não gasosos (partículas sólidas) aparentemente não influíram no desenvolvimento da cavitação, apesar de constituírem a maioria dos núcleos presentes*”. Conclui-se que as partículas não gasosas têm pouca influência no surgimento da cavitação, exceto em condições laboratoriais, conseqüentemente, o

desenvolvimento da cavitação está intimamente ligada à população de bolhas gasosas.

O conteúdo gasoso no interior das bolhas tem influência sobre no seu colapso, segundo GIKAS (1986), interferindo na dimensão do raio crítico da bolha, velocidades desenvolvidas nas paredes da bolha e nas pressões desenvolvidas no escoamento líquido. Segundo as pesquisas até então realizadas, não foram possíveis identificar o conteúdo das bolhas.

Figura 3. Formação do microjato em uma bolha aderida à uma superfície sólida. Fonte: Gibson (1968) *appud* GIKAS (1986).

GIKAS (1986) descreve o “modelo de colapso com jatos”, comentando ser o modelo mais aceito, como: “à medida que a bolha entra em colapso, devido às elevadas velocidades segundo as quais a parede da bolha passa a se mover no

sentido de seu interior, de escoamentos locais induzidos pelo movimento da parede que tomam a configuração de microjatos; tais microjatos, interagindo com a parede e com o conteúdo gasoso da bolha, que desempenha função semelhante ao de ar preso numa tubulação e submetido à variação brusca de pressão, geram ondas de pressões em suas imediações de valores muito superiores às pressões médias existentes no meio líquidos e portanto com capacidade de sobra de atuarem sobre contornos sólidos e danificá-los se a proximidade da superfície for suficiente. Dessa forma, as ondas de pressão geradas pela combinação do movimento da parede da bolha e dos microjatos localizados seriam responsáveis pela danificação que muitas vezes acompanha a presença da cavitação num meio líquido”. Esta seqüência pode ser observada, através da figura 3.

Figura 4. Esquema do escoamento reentrante em cavidade de grandes dimensões e do colapso de bolhas em movimento com o líquido. Fonte: Knapp (1970) *appud* GIKAS (1986).

Conforme a figura 4 demonstra, a hipótese utilizada nos modelos de cálculo anteriormente utilizado, na verdade não é real. Ao contrário dos modelos de cálculo, as bolhas são esféricas apenas durante as fases iniciais de colapso, segundo

GIKAS (1986), quando se inicia os microjatos, sua forma se altera de forma contínua até o colapso completo.

Segundo GIKAS (1986), os fatores adicionais que podem influenciar a cavitação são:

- Massa específica;
- Pressão de vapor;
- Viscosidade absoluta;
- Tensão superficial;
- Temperatura;
- Teor gasoso do escoamento;
- Núcleos e aditivos;
- Propriedades termodinâmicas;
- Influência das propriedades dos sólidos em interação com o escoamento.

3.1.2. Avaliação da Intensidade de Cavitação

O índice de cavitação é utilizado para definir uma referência para indicar o aparecimento de cavitação. Na sua fórmula clássica, equação 8, apresenta-se como uma relação entre o trabalho piezométrico e a energia cinética do escoamento. Segundo GIKAS (1986), esta definição é de pequena utilidade, principalmente nos estágios dos estudos em que a cavitação ocorre. Ainda segundo GIKAS (1986), o uso da mesma tem sido indistintamente feito em qualquer regime, não considerando que a mesma foi deduzida considerando-se a presença de cavitação.

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho U^2} \quad (8)$$

Onde:

p_v = Pressão na de vapor do líquido;

p_{∞} = Pressão nas vizinhanças da cavidade;

U = Velocidade da parede da cavidade no instante t;

ρ = Massa específica do fluido;

σ = Índice de cavitação.

Ao longo do tempo foram sendo desenvolvidas equações que visam chegar a um índice de cavitação mais adequando à situação onde o mesmo é aplicado. A equação 9, desenvolvida por Ball, Tullis, Stripling e Govindarajan *appud* GIKAS (1986), foi proposta com base em estudo de cavitação com válvulas. A determinação da cavitação ocorrida em blocos de dissipação, com diversas geometrias é a função da equação 10, citada por Quintela e Ramos (1980) *appud* GIKAS (1986).

$$\sigma = \frac{H_j - H_v}{H_m - H_j} \quad (9)$$

$$\sigma = \frac{H_{atm} + h_c + H_v}{\frac{v^2}{2g}} \quad (10)$$

Onde:

g = Aceleração gravitacional;

H_{atm} = Altura correspondente à pressão atmosférica local;

- H_j = Carga a jusante;
 H_m = Carga a montante;
 H_v = Altura devida à pressão de vapor do líquido;
 h_c = Entalpia por unidade de peso;
 v = Velocidade do escoamento;
 σ = Índice de cavitação.

Uma das formas de apresentação do índice de cavitação mais utilizadas é o NPSH (*Net Positive Suction Head*), utilizado para estimar o ponto de início da cavitação em máquinas, como por exemplo, em sistemas de bombeamento. Segundo NETTO (1998), o critério de Thoma, equação 11, é usualmente utilizado para verificação das condições de funcionamento de uma instalação. Ainda segundo o mesmo, os fabricantes costumam fornecer os valores limites requeridos para cada equipamento.

$$\sigma = \frac{H_{atm} - H_s - H_v}{H_T} \quad (11)$$

Onde:

- g = Aceleração gravitacional;
 H_{atm} = Carga correspondente à pressão atmosférica local;
 H_s = Carga de sucção das bombas;
 H_T = Carga manométrica efetiva da bomba;
 H_v = Carga devida à pressão de vapor do líquido;
 σ = Índice de cavitação.

A tentativa de definição de um índice de cavitação o qual fosse mais adequado fisicamente, levou Keller, segundo GIKAS (1986), a propor a equação 12. Esta equação é de cunho teórico, de difícil aplicação prática.

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_p}{\frac{v_{\infty}^2}{2} \rho} + \frac{\Delta p_m + \Delta p_{tr} + \Delta p_a + p_g}{\frac{v_{\infty}^2}{2} \rho} - \frac{\frac{2\sigma_s}{R}}{\frac{v_{\infty}^2}{2} \rho} \quad (12)$$

Onde:

p_g = Pressão parcial do gás no interior de uma cavidade;

p_p = Pressão do escoamento potencial;

p_{∞} = Pressão numa seção de referência, “longe” da seção considerada;

R = Raio de uma cavidade no instante t ;

v_{∞} = Velocidade numa seção de referência, “longe” da seção considerada;

Δp_a = Desvio entre p_p e p_g ;

Δp_m = Componente de pressão devido à turbulência natural do escoamento;

Δp_{tr} = Componente de pressão devido à influência da rugosidade;

σ = Índice de cavitação;

σ_s = Tensão superficial do fluido;

ρ = Massa específica do fluido;

Segundo GIKAS (1986) entre os diversos pesquisadores, “em função da técnica de detecção da cavitação usada, que por sua vez depende do equipamento

disponível, definem de maneiras distintas o (s) estágio (s) de cavitação de seu interesse experimental”. Existe uma concordância entre os diversos autores nos seguintes termos:

- Índice de cavitação incipiente: Utilizado para identificar a fronteira entre a inexistência de cavitação e o princípio de sua ocorrência;
- Índice de cavitação desinente e Histerese: segundo GIKAS (1968), *“designa uma fronteira a partir do qual a cavitação desaparece no meio líquido”*;
- Índice crítico de cavitação: indica uma fronteira de cavitação desejada, relativa aos outros índices de cavitação;
- Índice de Início de Danificação por Cavitação: Limite de cavitação ligado à severidade de seu ataque aos contornos sólidos confinantes do escoamento;
- Índice de cavitação por bloqueio: designação utilizada usualmente para dispositivos inseridos em condutos forçados, podendo indicar a situação que a seção de menor área de um dispositivo experimental para controlar o escoamento.

Conforme apresentado, existem várias maneiras de avaliação da cavitação, com diversos índices de cavitação distintos, sendo cada um adaptado à uma situação diferente. Segundo GIKAS (1986), mesmo quando é possível fazer previsões analíticas do início da cavitação, dependendo dos condicionantes do escoamento, estas podem apresentar falhas.

3.2. Levantamento do Estado da Arte

O presente levantamento do estado da arte será desenvolvido com enfoque cronológico nos trabalhos precursores, clássicos e recentes. Inicialmente serão analisados os trabalhos precursores, os quais ressaltaram a importância da instalação de aeradores nos extravasores. Em seguida serão analisados os trabalhos clássicos, que são trabalhos mais avançados, os quais tratam o tema com riqueza de detalhes, tornando-se referência aos demais trabalhos existentes desde então. Ao final, serão apresentadas as bibliografias recentes, as quais dão uma noção da produção científica atual sobre este tema. No fechamento, serão discutidos os principais trabalhos analisados.

HANNA (1938), faz uma introdução ao coeficiente de vazão e as várias formulações até então existentes para a estimativa de vazão sobre vertedores. A formação de pressões negativas sobre os mesmos é considerada apenas como um fenômeno que ocorre em alguns tipos de vertedores, dependendo do formato dos mesmos, o qual cita experimentos anteriores indicando o aumento na descarga de 5% em pressões negativas inferiores a aproximadamente 12,2 kPa (4 pés), não alertando para um possível surgimento de cavitação.

CREAGER (1945), ressalta que as forças provenientes do escoamento podem causar erosão no paramento e a jusante dele. Em grandes barragens, devido a grande diferença de cotas pode surgir a cavitação.

Segundo CREAGER (1945), em um modelo físico reduzido de extravasor qualquer não é possível reproduzir com exatidão os efeitos da tensão superficial da água, entrada de ar, formação de *spray* e pressão de cavitação. A dissipação de energia pode ser prevista com bons resultados, através de modelação física

reduzida, devendo-se evitar a adoção de obstáculos sólidos contrapondo-se ao jato, como por exemplo, os *chute-blocks* e os *baffle piers*.

A cavitação, segundo CREAGER (1945), ocorre ao redor dos *baffle piers* através da passagem de um fluxo em alta velocidade, conseqüentemente com grandes pressões negativas. A previsão da cavitação nestes pode ser feita através da expressão (13).

$$\frac{p_w}{\rho_w g} + S_b - k \frac{v_w^2}{2g} \geq \frac{p_v}{\rho_w g} \quad (13)$$

Onde:

ρ_w = Massa específica da água;

p_w = Pressão de água;

p_v = Pressão de vapor da água;

g = Aceleração gravitacional;

S_b = Submergência dos *Baffles Piers* sob o escoamento;

k = Coeficiente de perda de carga localizada;

v_w = Velocidade média do escoamento de água.

Quanto à construção do paramento do vertedor, CREAGER (1945), ressalta que as cristas curvas (perfis normais) têm melhor influência na redução de problemas de erosão a jusante. A redução da macrorrugosidade do paramento é outra forma citada para mitigação dos efeitos erosivos.

PETERKA (1953), faz a comparação entre os estudos em modelos reduzidos e os dados obtidos nos vertedores tulipa das barragens protótipo de Heart Butte e Shadehill. Foi adotada aeração no perfil do vertedor tulipa, conforme figura 5.

Os vertedores tulipa de ambas barragens, segundo PETERKA (1953), foram ensaiados a partir de modelo reduzidos nas escalas 1:21,5 e 1:20,73 respectivamente. O aerador foi colocado junto aos pilares do vertedor da barragem de Heart Butte, já em Shadehill o aerador foi colocado na base do vertedor na vertical do poço. Em ambos foram colocados defletores a fim de prover ar ao escoamento para reduzir os problemas com pressões negativas.

Figura 5. Sistema de Aeração do vertedor da barragem de Heart Butte. Fonte: Peterka (1953).

A comparação dos dados obtidos entre modelo e protótipo do vertedor tulipa da barragem de Heart Butte mostraram que os dados obtidos no modelo eram inferiores aos dados de protótipo, porém o formato da curva de vazão de ar era semelhante. No caso do vertedor tulipa da barragem de Shadehill, foi verificado que a vazão de ar aumenta conforme a vazão de água, sendo que a concentração de ar na água reduz-se com o afogamento do vertedor.

Segundo CHOW (1959) o escoamento no paramento dos vertedores normalmente flui a grande velocidade, quando esta for superior a aproximadamente

6,1 m/s inicia-se a mistura de ar atmosférico ao escoamento, elevando a altura da linha d'água. A entrada de ar ocorre dependendo também de fatores como condições de entrada, rugosidade do canal, distância percorrida, seção do canal, vazão, entre outros. Quando esta aeração torna-se insuficiente, será necessário a adoção de um aerador para evitar as baixas pressões.

Ainda segundo CHOW (1959), os estudos existentes para a determinação de um perfil otimizado para vertedores, foram propostos de modo diminuir a ocorrência de pressões negativas sobre as estruturas. A ocorrência de pressões negativas pode causar:

- Aumento do gradiente de pressão entre o extravasor e o reservatório;
- Mudança na forma da crista do vertedor, onde a crista é projetada;
- Flutuação ou mesmo pulsação de vazão;
- Instabilidade da performance hidráulica;
- Cavitação nas paredes das estruturas.

Hickox (1944) *appud* CHOW (1959), propôs um sistema aerador onde a aeração se dá através de uma parede vertical, onde o fluxo divide-se, parte passando acima e outra passando abaixo da mesma, conforme figura (6). A vazão de ar que entra no sistema pode ser estimada através das equações empíricas (14) e (15).

$$Q_a = \frac{5,68 \times (C_a \times H)^{3,64}}{\Delta p^{1,14}} \quad (14)$$

$$\sigma = \frac{y_H \times \sqrt{H_u}}{H^{1,15}} \quad (15)$$

Figura 6. Aerador proposto por Hickox. Fonte: CHOW (1959).

Onde:

Q_a = Vazão de ar;

C_a = Coeficiente de vazão de ar do aerador;

H = Espessura do escoamento na parte superior do aerador;

H_u = Altura da lâmina d'água sobre a crista do vertedor;

Δp = Diferença entre pressões;

y_H = Espessura do escoamento na parte inferior do aerador;

Tabela 1. C EM FUNÇÃO DE σ . FONTE CHOW (1959).

σ	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5+
C_a	0,077	0,135	0,175	0,202	0,220	0,225

MARTINS (1960) apresenta as vantagens e desvantagem da aeração em vertedores tulipa e faz uma análise sobre a necessidade de aeração nos mesmos. O mesmo ressalta a importância da aeração diante da possibilidade de danos às estruturas do vertedor tulipa.

A colocação de uma chaminé de aeração junto à parte interna da curva que fica entre o poço e a galeria do extravasor é indicado por MARTINS (1960) como

forma de introduzir ar no escoamento, a fim de mitigar os problemas anteriormente mencionados.

O método proposto pelo U.S.A. Department of Army (1953), *appud* MARTINS (1960), é indicado para o dimensionamento do aerador de extravasores do tipo tulipa. Trata-se de método gráfico, baseado em experimentos empíricos a partir do cálculo do número de Froude. Este método não tem sua consistência analisada por MARTINS (1960), apenas sendo citado sua utilização para projeto do aerador do extravasor da barragem de Paradela.

ABECASSIS (1961) estudou a relação entre os modelos de soleiras normais existentes e os padrões de pressões atribuídos às mesmas. Segundo o mesmo, a ocorrência de cavitação no paramento é uma somatória de problemas especiais, ligados com a estabilidade da veia líquida e com a rugosidade dos paramentos.

Os perfis clássicos de soleiras descarregadoras são analisados por ABECASSIS (1961) com base no coeficiente de vazão apresentados pelos mesmos. As pressões negativas formadas pelos mesmos tendem a contribuir de forma positiva no coeficiente de vazão, porém não são desejáveis devido à ocorrência de cavitação a montante.

ABECASSIS (1961) ao estudar as soleiras descarregadoras normais detectou que o maior decréscimo na pressão ocorre pouco a montante da crista das mesmas. A fim de mitigar este problema, ABECASSIS (1961) propôs a inserção de um arco a montante dos perfis normais a fim de melhorar a transição do escoamento a montante para o perfil normal.

Um estudo de perfis isóbaros, que mantém a pressão constante, foi elaborado por ABECASSIS (1961). Segundo o mesmo o estudo destes perfis podem ser

utilizados para determinar perfis fortemente mergulhantes, ou seja, economicamente mais viáveis. Os resultados foram que, em um perfil isóbaro, a zona deprimida do escoamento encontra-se uniforme sobre a seção de controle, ao contrário dos perfis normais, influenciando no coeficiente de vazão dos mesmos.

Figura 7. Escoamento sobre um perfil, em processo de cavitação. Fonte: ABECASSIS (1961)

ABECASSIS (1961) propõe o seguinte método, baseado no estudo experimental da camada limite sobre o paramento, para estimativa da ocorrência de cavitação sobre o mesmo:

- Estudar o desenvolvimento da camada limite;
- Determinar os valores da espessura de deslocamento;
- Traçar a superfície livre;
- Efetuar a correção da superfície livre, somando-se a espessura de deslocamento;

- Traçar as linha equipotencias e linhas de corrente;
- Calcular o valor da velocidade a partir da equação de Karman-Prandtl (16), igualando a espessura da camada limite à espessura do escoamento, obtendo-se os valores da velocidade de atrito ao longo do escoamento;

Figura 8. Correção do perfil proposta. Fonte: ABECASSIS (1961)

$$\frac{0,99U}{\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}}} = 5,75 \log\left(\frac{\delta}{K}\right) + 8,5 \quad (16)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} \quad (17)$$

Onde:

U = Velocidade do escoamento na borda da camada limite;

u_* = Velocidade de atrito do escoamento;

K = Constante de Von Karman;

δ = Espessura da camada limite;

τ_0 = Tensão de cisalhamento do escoamento no fundo;

ρ_w = Massa específica da água.

- Por meio da variação da pressão em função da velocidade de atrito (u_*) é possível verificar as pressões mínimas que ocorrerão no paramento, utilizando-se a equação (17), verificando-se a possibilidade de cavitação no mesmo.

Estudos realizados em modelo físico reduzido pelo CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1) demonstrara que o coeficiente de vazão do projeto, até então adotado para o vertedor tulipa da Barragem de Atibainha, tinha capacidade de engolir de 30% a 40% mais vazão em relação ao previsto em projeto. Este fato deve-se ao perfil de pressões ter sido bastante deprimido, influenciando o coeficiente de vazão, podendo ter como consequência forte cavitação no mesmo.

Figura 9. Ensaio em modelo reduzido do vertedor tulipa de Atibainha. Fonte: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1)

O projeto do extravasor foi alterado, incluindo-se um anel de tomada com melhoria da conformação hidráulica da tulipa, a fim de promover a aeração do

indício de cavitação nesta estrutura, sendo mitigada pelo funcionamento dos dispositivos aeradores.

Segundo CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1), a aeração desta estrutura, resultou em uma substancial diminuição das pressões negativas ao longo de todo o poço do vertedor.

Figura 11. Comparação da curva de descarga do vertedor tulipa da barragem de Atibainha obtidas em ensaio com a configuração de projeto e com aeradores. Fonte de dados: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1).

A validação dos dados obtidos nos ensaios de aeração é justificada pelo CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1): “A determinação da vazão de ar arrastado, realizada pelo Laboratório de Hidráulica em modelo reduzido, é válida

pois trata-se de escoamento a baixa velocidade ($Ma < 0,2$) o que permite considerar o ar como sendo fluido incompressível”.

A barragem de Atibainha faz parte do sistema Cantareira, o qual fornece aproximadamente 50% da vazão consumida na região metropolitana de São Paulo. De modo semelhante à Atibainha, o vertedor tulipa da barragem de Cachoeira, integrante do mesmo sistema de abastecimento, teve os mesmos problemas enfrentados pelo vertedor da primeira, segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-2).

Figura 12. Comparação da curva de descarga do vertedor tulipa da barragem de Cachoeira obtidas em ensaio com a configuração de projeto e com aeradores. Fonte de dados: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-2).

A vazão de projeto do vertedor de Cachoeira é consideravelmente maior, porém tendo os mesmos problemas de cavitação de Atibainha. O coeficiente de vazão ensaiado era maior que o previsto em projeto. O CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-2) ensaiou o mesmo em modelo físico reduzido, propondo a adoção de aeradores com a finalidade de mitigar os problemas causados pelas pressões negativas na parede do poço e, conseqüentemente retornar o coeficiente de vazão do mesmo aos níveis previstos em projetos.

O CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1978) realizou estudo em modelo físico reduzido para o vertedor tulipa da barragem de Jacareí, incluindo um aerador, em forma de defletor a montante da curva do final do poço da vertedor. Segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1978), a passagem do escoamento sobre o defletor, que ocupa toda a seção do poço, forma pressões negativas, onde se faz a aeração.

O CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982), apresenta resultados de ensaios em modelação física reduzida para o vertedor da barragem de Pedra do Cavalo. Os ensaios realizados tiveram como objetivo a verificação do desempenho do sistema de aeração.

Considerou-se, segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982), os efeitos significativos de escala nos processos de arrastamento de ar. Foram estudadas as vazões de ar que entram pelos poços de aeração e os alcances dos jatos sobre os aeradores, com diferentes vazões de água sobre o vertedor.

Sobre os resultados dos estudos realizados, o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982) ressalta que apesar da precariedade da semelhança física, o modelo foi considerado de funcionamento semelhante a outros de obras até então construídas com sucesso.

Nos anos 80, inspeções sub-aquáticas, segundo CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1990), demonstraram danos aos blocos de dissipação da bacia do tipo USBR II, instalada a jusante do vertedor da UHE Porto Colômbia. Tais danos já tinham sido relatados, segundo o mesmo autor, para outras obras que utilizam o mesmo tipo de bacia de dissipação.

Figura 13. Ensaio do vertedor da UHE Pedra do Cavalo, vide aeradores. Fonte: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982).

Os ensaios realizados em modelo físico reduzido com escala 1:50 demonstraram que havia o aparecimento de vórtices do tipo ferradura, conforme mostrado na figura 14, nas proximidades das paredes dos *chute-blocks*. Nesta região, quando submetida à passagem do escoamento, geravam-se valores muito baixos de pressão, suficiente para o aparecimento de cavitação nos blocos. Este fenômeno tornava-se mais intenso nas vazões médias, entre 6000 e 8000 m³/s. Segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1990), “o vórtice se forma devido à mudança brusca de direção do escoamento, quando incide sobre o bloco

de queda (...) gera depressões importantes em seu inteiror, produzindo em consequência as bolhas cavitantes”.

O CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRAULICA (1990) conclui que não houve dúvida quanto ao aparecimento de cavitação em função do vórtice do tipo ferradura. As bolhas cavitantes são implodidas nas zonas de alta pressão nas proximidades dos blocos, em função dos próprios vórtices e das oscilações de pressões, ambas com efeito de aproximar as bolhas das estruturas. Complementando, o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1990) sugere a construção de um modelo físico reduzido, na escala 1:20, para que possa ser estudados com melhor precisão estes fenômenos.

Figura 14. Vórtices em Chute Blocks. Fonte: CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1990)

Segundo PINTO (1979) a erosão mais conhecida ocorrida em extravasores foi no túnel do extravasor da barragem de Hoover, em 1941, onde o volume erodido chegou a 1500 m³. Verificou-se que a cavitação ocorreu entre 400 m³/s e 1000 m³/s,

ocorrendo após um ondeamento da superfície na curva, onde a tubulação possuía 15 metros de diâmetro e 53° de inclinação.

Os métodos classicamente utilizados para combate aos efeitos nocivos da cavitação, segundo PINTO (1979), foram aumentar a resistência da superfície atacada ou reduzir as macrorrugosidades do contorno. A utilização de ambos métodos torna-se um problema econômico, visto o custo de implantação e não garantir a mitigação de novos ataques.

Em extravasores onde a vazão específica é inferior a 10 m³/(sm), segundo PINTO (1979), a auto-aeração tem se demonstrado suficiente para a prevenção e mitigação dos efeitos da cavitação. Em vazões unitárias superiores a esta, a difusão do ar que é incorporado pela superfície do escoamento tem maior dificuldade em atingir as camadas inferiores do escoamento.

A otimização dos dispositivos aeradores é considerada por PINTO (1979) como em fase incipiente, sendo a modelação física reduzida a forma mais indicada para a otimização. O mesmo relata que o fenômeno não é perfeitamente conhecido, sendo que, mesmo a modelação física reduzida, nem sempre pode ser adequadamente representada.

PINTO (1979) recomenda para a otimização de aeradores em modelos físicos reduzidos:

- O modelo físico reduzido deve ter a maior escala possível;
- A vazão de ar deve ser estimada nas informações colhidas no protótipo;
- As perdas de cargas do escoamento do ar através dos condutos de aeração devem ser calculadas a fim de estimar a pressão sob a lâmina vertente a jusante do degrau ou rampa;

- Em condições de semelhança em relação ao número de Froude, devem ser simuladas as pressões calculadas anteriormente;
- Devem ser corrigidos e aperfeiçoados os dispositivos;
- É necessário estudar o espaçamento necessário entre os aeradores;

PINTO (1979) ressalta a importância dos dados experimentais para o aperfeiçoamento dos dispositivos aeradores. Os mesmos futuramente poderão servir como base para a definição de novos critérios de projeto.

PINTO (1988) relata que em estudos experimentais foi verificado que ocorre o colapso das bolhas de cavitação ao entrarem em uma zona de maior pressão, podendo provocar pressões da ordem de 7000 a 70000 kgf/cm². Isoladamente estas bolhas não provocam danos à estrutura, porém as mesmas tendem a se deslocar através do fluxo, fazendo com que as mesmas se concentrem à medida que se aproximam do ponto de implosão.

Segundo PINTO (1988), em casos onde a camada limite separa-se antes que ocorra cavitação ou o crescimento e colapso das bolhas individuais de cavitação altere a distribuição de pressões, se estabelece um vórtice estável no escoamento. Este fenômeno é utilizado em bacias de dissipação onde existem os chamados blocos supercavitantes, também é utilizada em ranhuras de comportas de fundo.

Figura 15. Linhas equipotenciais de pressão sobre o paramento. Fonte: Pinto (1988).

As bolhas de cavitação são formadas principalmente a partir de macrorrugosidades no fundo do vertedor quando submetidas a escoamento de alta velocidade. Macrorrugosidades, mesmo de pequenas dimensões, podem ter seu efeito sobre o escoamento potencializado em locais de acentuada curvatura, sob influência de uma comporta, que segundo PINTO (1988), elimina a camada limite que naturalmente se formaria naquele local.

Figura 16. Modelo experimental de aerador em laboratório. Fonte Pinto (1988)

Segundo PINTO (1988), a cavitação em fluxos em alta velocidade está intimamente ligada com alta concentração de vazão, devido a maior lâmina d'água que o ar tem para se dispersar no mesmo. O mecanismo de auto-aeração tem se demonstrado eficiente para vazões específicas menores que $10 \text{ m}^3/(\text{sm})$.

A redução da cavitação pode ser obtida por dois métodos distintos: a redução das macrorrugosidades existentes no paramento ou a aeração do escoamento, visando o aumento da pressão no escoamento. A primeira alternativa tem-se demonstrado pouco econômica, pois é necessária uma superfície muito lisa, e nem sempre eficiente. A aeração artificial da camada inferior do escoamento surge

como uma alternativa mais econômica e eficiente de reduzir a cavitação sobre o paramento.

O ar atua sobre o escoamento, segundo PINTO (1988), através da sua liberação nas zonas de baixa pressão, limitando-a e amortecendo as ondas de choque resultantes das implosões das bolhas cavitantes. Segundo o mesmo autor, a injeção de 5% de ar no escoamento é suficiente para eliminar os efeitos erosivos da cavitação.

PINTO (1988) classifica os aeradores em calhas para paramentos em 3 grupos distintos:

- Súbita descontinuidade do fundo do paramento, onde a parte inferior do escoamento entra em contato com o ar (figuras 15a e 15b);
- Galeria ou recesso para aumento da vazão de ar injetada (figuras 15c e 15d);
- Combinação dos dois sistemas anteriormente citados (figuras 15e e 15f).

Figura 17. Tipos de aeradores mais utilizados. Fonte: Pinto (1988)

A admissão do ar para o aerador pode ser feita através de dutos laterais, ranhuras na parede ou defletores, conforme pode ser observado na figura 16.

Figura 18. Formas de admissão de ar. Fonte: PINTO (1988).

A introdução de ar sob o escoamento modifica o campo de pressões sobre o paramento do vertedor. Segundo PINTO (1988), ocorre no jato livre o equilíbrio entre as forças de inércia e gravitacional, a turbulência é intensificada pelo gradiente de velocidades, modificando o arranjo do campo de pressões.

Na seção longitudinal o ar penetra tanto pela superfície livre superior quanto pela superfície livre formada no aerador, sendo misturado através de difusão turbulenta. Na seção transversal, segundo PINTO (1988), forma-se uma região externa de borrifos intensos e uma região interna que se caracteriza pela admissão de ar em formas de bolhas arrastadas pela água.

O projeto de um aerador, segundo PINTO (1988), deve levar em conta o local de implantação de primeiro aerador de montante, a vazão de ar que o escoamento deve arrastar e o espaçamento entre aeradores, se for o caso de haver mais de um.

Os aeradores serão itens indispensáveis no paramento, quando as velocidades forem superiores a 30 m/s. Abaixo deste valor é possível evitar a cavitação diminuindo a macrorrugosidade da superfície do paramento.

Segundo PINTO (1988) o cálculo da aeração pode ser equacionado através das formulações 18, 19, 20 e 21. Este equacionamento foi utilizado para o dimensionamento dos aeradores do vertedor da UHE Foz do Areia, figura 19.

$$q_a = k_a v_w L_j \quad (18)$$

$$K = f\left(Fr, Eu, \frac{h_d + h_s}{h}\right) \quad (19)$$

$$L_j = f(q_w, Eu) \quad (20)$$

$$Eu = f(q_w, q_a) \quad (21)$$

Onde:

L_j = Comprimento de lançamento do jato sobre o aerador;

q_a = Vazão específica de ar;

q_w = Vazão específica de água;

v_w = Velocidade média do escoamento de água;

k_a = Coeficiente de entrada de ar no aerador;

Fr = Número de Froude;

Eu = Número de Euler;

h = Espessura do escoamento no lançamento do jato;

h_d = Altura da defletor do aerador;

h_s = Altura do degrau do aerador.

Figura 19. Função $q_a = f(q)$ medida em Foz do Areia. Fonte: PINTO (1988)

A resolução da expressão (20), segundo PINTO (1988), deve ser feita através de modelagem física reduzida, tomando-se cuidado de evitar que a tensão superficial influencie o resultado. Já a expressão (21), o autor indica a utilização de modelagem física reduzida ou a utilização do equacionamento através do método dos elementos finitos, como o proposto por Wei e Defazio, mesmo sendo de extrema complexidade. A expressão (21), pode ser aplicada com auxílio da expressão (19).

Figura 20. Distribuição típica de pressões sob o jato transversalmente ao fluxo. Fonte: PINTO (1988)

1. Uma zona superior, onde há apenas gotas provindas do fluxo lançadas pela turbulência do mesmo;
2. A zona de mistura é onde está contida a superfície da água, porém esta se apresenta de forma irregular. O limite desta é a amplitude das ondulações da superfície do escoamento;
3. Sob a superfície está a zona aerada; nesta região ocorre a difusão do ar no escoamento;
4. No fundo do escoamento apresenta-se uma zona livre de aeração. A cavitação é um fenômeno que ocorre nesta última zona, pois a redução da pressão não sofre a influência do ar dissolvido.

SZPILMAN (1980) relata que devido às dimensões dos extravasores da barragem de Itaipu, com o desnível variando entre 80 e 85,5 metros e vazão específica máxima de $185 \text{ m}^3/(\text{s.m})$, os mesmos enquadram-se nos parâmetros considerados pela literatura até então existente sobre cavitação em vertedores. Como medida preventiva foram instaladas duas calhas aeradoras, nos três vertedores existentes em Itaipu a serem utilizadas caso forem constatados efeitos de cavitação sobre o paramento.

Hamilton *appud* SERRA (1986), descreve o processo erosivo causado pela cavitação como fenômenos vibratórios provocados por pressões da ordem de 10^8 Pa, devido a formação de ondas de choque após o colapso das bolhas de vapor. Segundo o mesmo, devido às grandes dimensões dos vertedores existentes em algumas barragens, mesmo em estruturas muito bem executadas, aparecem imperfeições na concretagem, sendo um fator potencializador da cavitação.

Nas estruturas de concreto bem executadas, segundo SERRA (1986), a experiência tem demonstrado que a cavitação aparece em velocidades superiores a 30 m/s, dependendo da pressão existente próximo onde ocorre a cavitação. A aeração natural é um fenômeno que pode mitigar os efeitos da cavitação, porém segundo o mesmo autor, para vazões específicas próximas de 100 m³/(sm), segundo SERRA (1986), *“a mesma iniciará após a distância de 300 a 600 m do percurso da água no vertedor, com inclinações entre 10% e 60%”*, não sendo, em muitos casos, possível contar com este fenômeno mitigador.

Ainda segundo SERRA (1986), o dispositivo aerador por degraus é que têm a preferência dos projetistas, tendo em vista sua eficiência, facilidade de execução e mitigação dos problemas causados pelas juntas de construção dos vertedores. Geralmente são construídos com altura variando entre 1 e 2 metros.

A determinação da vazão de arraste de ar segundo Hamilton *appud* SERRA (1986) é determinada a partir da equação (18).

Para o coeficiente k, em experimentos empíricos, foram encontrados valores entre 0,01 e 0,035, sendo função da expressão (22).

$$k_a = f \left[Fr, Eu, \left(\frac{h}{y} \right) \right] \quad (22)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2} \rho_w v_w^2} \quad (23)$$

Onde:

Eu = Número de Euler;

Fr = Número de Froude;

- h = Espessura do escoamento no lançamento do jato;
 k_a = Coeficiente de entrada de ar no aerador;
 v_w = Velocidade média do escoamento de água;
 y = Coordenada no plano vertical;
 Δp = Diferença entre pressões;
 ρ_w = Massa específica da água.

Figura 22. Entrada de ar no aerador da UHE Pedra do Cavalo. Fonte: Serra (1986).

SERRA (1986) exemplifica a utilização de aeradores com o caso do vertedor da barragem de Pedra do Cavalo, o qual conta com dois aeradores seqüenciais, espaçadas em 70 m, estando o primeiro a 148 m a jusante da crista do vertedor. A adução de ar para os aeradores é feita através de dutos localizados nos muros laterais do vertedor, conforme figuras 21 e 22.

Figura 23. Sistema de aeração do vertedor da UHE Pedra do Cavallo. Fonte: Serra (1986)

CUOMO (1987), com o objetivo de reconhecer e avaliar o processo de arrastamento de ar, comparou um protótipo com seu modelo físico reduzido. Para tal, foi utilizado o vertedor do tipo tulipa instalado na barragem de Paraitinga, instalando um anemômetro no pilar do extravasor e operação com dois modelos físicos reduzidos nas escalas 1:25 e 1:63,17.

Visando melhor a caracterização dos efeitos do arrastamento do ar, foi realizado inicialmente, no modelo, ensaios com o objetivo de reduzir ao máximo o efeito da perda de carga na tubulação de entrada de ar, aumentando o diâmetro da mesma até a obtenção de valores desejáveis. A partir da mitigação dos efeitos de perda de carga foram possíveis avaliações mais precisas do fenômeno estudado:

- Condicionantes derivadas das condições laboratoriais disponíveis;
- Concluiu CUOMO (1987) que podem ser considerados dois grupos principais de condicionantes para a escolha da escala de modelos físicos reduzidos de arraste de ar;
- Condicionantes derivadas de representação dos fenômenos de arrastamento de ar no modelo. Para evitar a influência dos fenômenos da tensão superficial e da compressibilidade do ar, o número de Weber deverá ser maior que 500 e o número de Mach deverá ser menor que 0,2. Ainda deverá ser analisado o número de Reynolds para evitar situações de instabilidade.

Segundo JANSEN (1988) escoamentos em paramentos com velocidades superiores a 30,5 m/s a estrutura pode vir a sofrer com problemas sérios devido à cavitação e, acima de 36,6 m/s, a aeração é um recurso obrigatório para prevenção da cavitação no extravasor. Segundo o mesmo, a instalação preventiva de

dispositivos aeradores é um custo muito menor em relação ao custo de um reparo em um extravasor seriamente danificado.

Para a instalação de aeradores, segundo JANSEN (1988), devem ser considerados três itens:

- O ponto de instalação do primeiro aerador;
- O volume de ar que deve entrar no aerador;
- A distância entre os aeradores subseqüentes, a fim de manter a proteção ao longo do paramento.

A avaliação do risco de ocorrência de cavitação pode ser feita pela expressão (24), porém a mesma despreza o efeito da irregularidade do concreto sobre o risco.

$$\sigma = \frac{\frac{p_w}{\rho_w g} - \frac{p_v}{\rho_w g} + h \cos \theta + \frac{h v_w^2}{g r_c}}{\frac{v_w^2}{2g}} \quad (24)$$

Onde:

p_w = Pressão de água;

p_v = Pressão de vapor de água;

ρ_w = Massa específica da água;

g = Aceleração gravitacional;

h = Espessura do escoamento no lançamento do jato;

θ = Ângulo de inclinação do canal;

v_w = Velocidade média do escoamento de água;

r_c = Raio de curvatura no plano vertical do fundo do canal (positivo se

côncavo);

σ = Índice de cavitação;

JANSEN (1988), cita que quando o índice de cavitação for inferior a 0,25, a cavitação pode ser provocada pela macrorrugosidade do concreto ou por velocidades do escoamento superiores a 30,5 m/s, sendo recomendada a instalação de um dispositivo aerador. Segundo o mesmo, a aeração é uma forma mais simples e prática em relação à mudança de especificações de projeto. O adequado dimensionamento do aerador deve prover o escoamento de vazão de ar suficiente para que seja mitigado o efeito da cavitação a jusante do mesmo.

O mecanismo natural da entrada de ar ao longo de vertedores pode ser estimado a partir da camada limite, descrita na forma da equação (25). Esta aeração natural pode não ser suficiente para evitar o aparecimento de cavitação ao longo do paramento.

$$\frac{\delta}{x} = m \left(\frac{x}{K} \right)^{-n_e} \quad (25)$$

Onde:

δ = Espessura da camada limite;

x = Distância no plano horizontal a partir de um ponto de referência;

K = Constante de Von Karman;

m = Parâmetro geométrico empírico de correção;

n_e = Parâmetro exponencial empírico de correção.

Em experimentos realizados, porém não relacionados por JANSEN (1988), a distância para início do fenômeno da aeração é de aproximadamente 47,7 metros.

Este valor pode sofrer alteração, por influência de vórtices, comportas parcialmente abertas e descolamentos a montante dos pilares dos extravasores.

Segundo JANSEN (1988), ainda não foram definidos critérios para avaliação do espaçamento necessário entre aeradores, sendo os mesmos geralmente decorrentes de estudos empíricos. Em alguns extravasores, após observações, foram verificados números excessivos de aeradores. Straub e Anderson *appud* JANSEN (1988), concluíram que, para inclinações superiores a 30°, apenas um aerador pode ser suficiente para garantir a concentração de ar mínima necessária para mitigar os efeitos da cavitação.

Concreto reforçado por fibras, segundo JANSEN (1988), pode ser utilizado com sucesso em locais suscetíveis à cavitação. Estas controlam as micro-fissuras apresentadas pelo concreto, reduzindo a propagação das trincas.

JANSEN (1988) cita problemas ocorridos em alguns extravasores em virtude de cavitação, como em Madden Dam e Karnaphuli Dam. Também é enfatizado o bom comportamento do extravasor da barragem da UHE Foz de Areia diante a uma cheia de projeto ocorrida em 1983, em virtude da ação dos aeradores na proteção do extravasor contra a cavitação.

BORSARI (1989) estudou a relação entre as macrorrugosidades existentes na superfície dos vertedores de barragens com o aparecimento de cavitação nos mesmos. Este trabalho teve como pontos principais a caracterização do mecanismo de formação da cavitação e a caracterização dos efeitos de escala presentes na modelação física dos escoamentos água-ar.

Segundo o mesmo autor, a aeração é um modo eficiente de mitigação dos efeitos da cavitação, visto que esta aumenta a compressibilidade e elasticidade do

fluido. O aumento da compressibilidade e da elasticidade permite que o fluido absorva os impactos advindos das ondas de choque formadas no colapso das cavidades, restringindo o impacto a uma pequena fronteira próxima às mesmas.

Analisando o equacionamento existente até o momento, BORSARI (1989) evidenciou a importância do estudo dos aeradores a partir de modelação física reduzida. Tal evidência é causada pelo fato que as equações propostas pela bibliografia até então existente foram obtidas por correlações empíricas de conjuntos de dados específicos, na tentativa de generalização de sua utilização.

CHANSON (1989) realizou experimento em modelo físico reduzido da barragem de Clyde, em escala 1:15, com inclinação do paramento de $52,33^\circ$. Este estudo teve como objetivo, tendo como base os experimentos realizados, representar melhor o forte processo de dispersão do ar ocorrido no ponto de impacto do jato no aerador.

O mesmo autor conclui que além da entrada de ar através da superfície superior e inferior do jato, existe aeração junto ao ponto de impacto do jato. Foi proposto um método de determinação da quantidade de ar que entra no ponto de impacto através de dispersão turbulenta.

Tendo como objetivo apresentar o desenvolvimento dos sistemas de aeração, RUTSCHMANN (1990) faz uma abordagem experimental do tema. Ele relata que devido ao limitado conhecimento sobre aeradores em extravasores, algumas variáveis envolvidas no cálculo do coeficiente de aeração podem ser desprezadas.

Segundo RUTSCHMANN (1990) os projetos de aeradores podem ser divididos em dois passos: cálculo da resistência ao escoamento nos condutos e capacidade de entrada de ar no aerador. O primeiro é governado basicamente pela

equação da energia de Bernoulli. Sobre a capacidade dos aeradores, citando as várias bibliografias existentes até então sobre o tema, destaca os seguintes índices físicos: números de Froude (Fr), Reynolds (Re), número de Weber (W) e o número de turbulência (T).

RUTSCHMANN (1990) considera que o cálculo do comprimento de lançamento do jato sobre o aerador é determinante para a ocorrência do arraste de ar sobre o mesmo. A trajetória do jato pode ser aproximada, segundo o mesmo, para o comprimento percorrido pelo jato medido sobre a superfície do aerador. A equação (26) é apresentada como equação empírica para determinação da distância relativa percorrida sobre o aerador (λ_j).

$$\lambda_j = \frac{\bar{\alpha} Fr^2}{\cos \theta} \left[1 + \left(\frac{2h_r \bullet \cos \alpha}{\bar{\alpha} Fr^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (26)$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha} = \left[\operatorname{tgh} \left(\frac{h_r}{\alpha} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

$$h_r = \frac{(h_d + h_s)}{h} \quad (28)$$

Onde:

λ_j = Distância relativa do jato percorrida sobre o aerador;

Fr = Número de Froude;

$\bar{\alpha}$ = Ângulo de lançamento relativo do jato sobre o defletor;

α = Ângulo de lançamento do jato sobre o defletor;

θ = Ângulo de inclinação do canal;

h = Espessura do escoamento no lançamento do jato;

h_d = Altura da defletor do aerador;

h_r = Altura relativa do lançamento do jato sobre o aerador;

h_s = Altura do degrau do aerador.

O ângulo de lançamento relativo ($\bar{\alpha}$) pode ser obtido através das expressões (27) e (28).

RUTSCHMANN (1990) conclui que para a determinação da entrada de ar em um aerador, podem ser feitas duas aproximações. A primeira consiste em fazer uma análise dimensional do escoamento sobre o paramento. O segundo consiste em aproximar o comprimento do jato à sua projeção no paramento.

O UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1990) sugere para a análise de escoamentos com velocidades superiores a 10 m/s, as seguintes características para indicar o aparecimento de cavitação sobre os paramentos:

- Causa da cavitação;
- Localização do dano;
- Intensidade da cavitação;
- Magnitude da velocidade do escoamento;
- Quantidade de ar diluído;
- Resistência da superfície ao dano provocado pela cavitação;
- Tempo de exposição da superfície à cavitação.

A adoção de reforço em chapas de aço contra a cavitação pode não ser uma solução, segundo o UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1990), pois as

mesmas podem vibrar causando danos mecânicos à superfície protegida. O mesmo cita o exemplo do extravasor da barragem Glen Canyon, onde o concreto foi atacado após o fim da proteção feita de aço contra cavitação.

Segundo Tomimita e Shima, *appud* UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1990), o colapso de várias bolhas de vapor ao mesmo tempo em uma mesma vizinhança resulta em ondas de choque cuja celeridade alcança 1,5 vezes a velocidade do som ($Ma = 1,5$). Os distúrbios no escoamento provocam ondas que se propagam na velocidade do som, o colapso de uma bolha causa uma onda de choque fazendo com que as outras, na vizinhança, também entrem em colapso.

Segundo o UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1990), atualmente existem duas teorias que visam explicar o efeito de mitigação da cavitação através da aeração. A primeira é baseada na presença de gases não condensáveis no vapor, causando o retardamento do colapso das bolhas cavitantes. A segunda teoria baseia-se na mudança da velocidade do som do fluido na presença de ar não dissolvido, diminuindo a velocidade de propagação das ondas de choque entre as bolhas cavitantes.

A primeira instalação de um aerador em um extravasor, segundo o UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1990), foi na barragem de Yellowtail. Após o sucesso observado no controle da cavitação através da aeração no extravasor de Yellowtail, foram instalados aeradores em barragens de todo o mundo.

Segundo UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION (1990), no projeto de um aerador deve-se levar em consideração a localização do mesmo, a escolha entre rampa ou defletor, o dimensionamento da tomada de suprimento do ar e o dimensionamento da saída a jusante. É indicado que a instalação do aerador seja

feita em zonas do paramento onde o índice de cavitação seja menor que 0,20 em uma vazão modeladora a ser determinada. O espaçamento entre aeradores através da determinação da distância onde a queda da concentração de ar devido a turbulência faz a sua utilização necessária.

OLINGER (1990) realizou experimentos sobre aeração no CEHPAR, da Universidade Federal do Paraná, a partir de um aerador de escoamento d'água vertical descendente. Os resultados foram comparados com o método analítico proposto por Glasov em 1984.

Segundo OLINGER (1990), este método consiste em estimar o processo de arraste de ar pelo escoamento de água através do estudo de sua dispersão dentro do escoamento de água. A dispersão do ar no escoamento d'água inicia-se na entrada deste no aerador e termina quando o mesmo toca no fundo do vertedor. A vazão de ar é considerada como uma função da espessura da fase aerada dentro do escoamento de água, no ponto término da dispersão.

Em sua conclusão, OLINGER (1990) relata os dados obtidos com o aerador experimental utilizado e compara com os obtidos pelo método de Glasov. Segundo o mesmo, este método analítico apresenta resultados aproximados aos experimentais, porém não considera a influência do gradiente de pressões sobre a intensidade de difusão lateral, podendo resultar em alteração na intensidade de difusão, recomendando a elaboração de métodos analíticos mais elaborados. O principal efeito observado devido ao gradiente transversal de pressões foi a alteração na geometria do jato.

WOOD (1991) faz uma síntese sobre aeração em canais abertos, com enfoque em aeração em vertedores. O mesmo faz uma abordagem, desde os primeiros trabalhos sobre cavitação em superfícies de concreto realizados por

Peterka nos anos 50, aos trabalhos até então mais recentes realizados por Nelson L. Souza Pinto, no início dos anos 80.

Inicialmente WOOD (1991) faz uma introdução abordando os tipos de escoamentos bifásicos ar-água, os principais tipos e processos de entrada de ar a partir de estruturas hidráulicas, os efeitos gerados pela mesma, parametrização, formação e transporte das bolhas de ar.

Segundo WOOD (1991), a manutenção das pressões moderadas em sistemas hidráulicos pode ser feita através da entrada de ar no mesmo. O contato do escoamento com um volume de ar infinito causa o fenômeno da água branca ("falling water"), com conseqüente aumento do volume de escoamento. Em escoamentos livres sem contato com a atmosfera remota, ou seja, interagindo com volumes finitos de ar, é gerado um escoamento de ar, podendo ser no sentido ou em sentido contrário ao escoamento, devido a interação superficial do ar com a água, sendo que o volume de ar carregado pode ser estimado a partir da velocidade do escoamento da água.

Segundo WOOD (1991), os tipos de aeração em processos de entrada em estruturas hidráulicas são cinco:

- Aeração superficial em escoamento de alta velocidade: a aeração se dá através da quebra da tensão superficial da água devido à turbulência, formando um processo de difusão turbulenta;
- Aeração pontual por colisão do jato: aeração devido a descontinuidade de uma superfície d'água;
- Aeração pontual em configuração de impacto de jato: a aeração ocorre através da turbulência gerada no escoamento em queda livre;

- Aeração pontual causada por ressalto hidráulico: a turbulência gerada na superfície da água em um ressalto hidráulico provoca a difusão do ar no escoamento;
- Aeração induzida no escoamento: aeração provocada por formação de uma pressão negativa sob o escoamento.

A entrada de ar nos escoamentos, segundo WOOD (1991), pode gerar efeitos desejáveis ou não. O principal efeito da aeração é a prevenção do efeito da cavitação sobre as estruturas hidráulicas.

WOOD (1991) divide o escoamento em um aerador em cinco zonas diferentes:

- Aproximação: a velocidade do escoamento depende da distância da crista e da camada limite formada a partir da mesma;
- Transição: zona que coincide com o defletor;
- Aeração: região de lançamento do jato, onde ocorre a aeração através da superfície inferior;
- Reabilitação: região onde o grande gradiente de pressão provoca a rápida dispersão do ar;
- Reabilitação gradual das pressões: região onde o gradiente de pressão retorna a hidrostático, ocorrendo queda da concentração do ar.

A modelação matemática apresentada por WOOD (1991) é baseada em uma análise dimensional e ajustada sobre dados empíricos. O cálculo da aeração a partir da distância de lançamento do jato no aerador é considerada a melhor forma de

modelação. Os modelos propostos são ajustados através de curvas de demanda de ar, tendo como base a equação (29).

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = K_\beta \left[\frac{L_j}{h} \right] \quad (29)$$

Onde:

β = Coeficiente de aeração;

Q_a = Vazão de ar;

Q_w = Vazão de água;

K_β = Coeficiente de correção na fórmula de β ;

L_j = Comprimento de lançamento do jato sobre o aerador;

h = Espessura do escoamento no lançamento do jato.

O cálculo da trajetória do jato, segundo Schwarz & Nut (1963), *appud* WOOD (1991), pode ser feito através das equações (30) e (31). Este método admite as hipóteses que a tensão superficial é desprezível e que o defletor é longo o suficiente para tornar o escoamento uniforme sobre a rampa.

$$\frac{y}{h} = \frac{Fr^2 \sin \alpha}{\left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) \times \sin \gamma_0} \left[\cos \gamma_0 - \cos \left(\frac{v_w \left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) t}{Fr^2 h} + \gamma_0 \right) \right] \quad (30)$$

$$\frac{x}{h} = -\frac{v_j}{\left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) h} + \frac{Fr^2 \sin \theta}{\left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) \times \sin \gamma_0} \left[\sin \left(\frac{v_w \left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) t}{Fr^2 h} + \gamma_0 \right) - \sin \gamma_0 \right] \quad (31)$$

$$\gamma_0 = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) \cos \alpha}{\left(\frac{\Delta p}{\rho_w g h} \right) \cos \alpha + 1} \right) \quad (32)$$

Onde:

Fr = Número de Froude;

h = Espessura do escoamento no lançamento do jato;

t_j = Tempo de lançamento do jato;

v_j = Velocidade do jato sobre o aerador;

v_w = Velocidade media do escoamento de água;

x = Distância no plano horizontal a partir de um ponto de referência;

y = Coordenada no plano vertical;

α = Ângulo de lançamento do jato sobre o defletor;

ρ_w = Massa específica da água;

g = Aceleração gravitacional;

Δp = Diferença entre pressões.

HAGER (1992) descreve os principais tipos de aeração existentes: por ondas de choque, aeração natural e aeração através de aeradores. A aeração através de ondas de choque é causada por modificações geométricas do canal ou por regime bruscamente variado, a aeração provém da turbulência causada por tais mudanças. Devido à grande turbulência causada por escoamento com grande número de Froude (Fr), a aeração pode ocorrer naturalmente. O aerador é a forma de induzir a aeração do escoamento com grande número de Froude (Fr), visando aumentar a concentração de ar no escoamento.

Os parâmetros a serem considerados, segundo WOOD (1991), são:

- O comprimento a montante do defletor, incluindo o mesmo;
- A altura de lançamento da rampa;
- A extensão da rampa;
- A vazão modeladora e a vazão máxima;
- A rugosidade do concreto do extravasor especificada no projeto.

Segundo CHANSON (1993) a auto-aeração em rápidos de vertedores inicia-se após a crista do mesmo, com a formação da camada limite, devido à interação do escoamento com o fundo do canal. Esta camada limite aumenta de espessura ao longo do rápido, atingindo a superfície do escoamento, causando turbulência na superfície, mitigando o efeito da tensão superficial.

Figura 24. Perda de carga no vertedor. Fonte CHANSON (1993)

Figura 25. Estágios de aerção em vertedores. Fonte CHANSON (1993)

Após o ponto de interceptação da camada limite com a superfície do escoamento, o limite de penetração de ar no escoamento vai aumentando até o fundo do canal. Ao atingir todo o escoamento a concentração da mistura aumenta até chegar a um ponto de estabilização. À medida que aumenta a concentração de ar na água vai aumentando substancialmente o nível do escoamento sobre o vertedor.

Verificando o método desenvolvido por Wood em 1983, CHANSON (1993) realizou comparações com dados experimentais e as equações (33) e (34).

$$v' > \sqrt{\frac{8\sigma_s}{\rho_w d_p}} \quad (33)$$

$$v' > u_r \cos \theta \quad (34)$$

Onde:

- d_p = Diâmetro das bolhas de cavitação;
 v' = Velocidade mínima de aeração do escoamento;
 σ_s = Tensão superficial da água;
 ρ_w = Massa específica da água;
 u_r = Velocidade de surgimento das bolhas cavitantes;
 θ = Ângulo de inclinação do canal;

CARVALHO (1997), com o objetivo de investigar o dispositivo de aeração em vertedores, construiu um modelo físico reduzido, na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Um modelo físico reduzido foi construído no Laboratório de Hidráulica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – CREHEA no campus da Universidade de São Paulo, localizado na cidade de São Carlos. A partir dos resultados obtidos pelos ensaios no modelo físico reduzido foram comparados com equações empíricas e estruturas existentes.

Inicialmente foi feita uma varredura na bibliográfica existente, visando a identificação dos mecanismos físicos formadores da cavitação. Investigaram-se, também, na bibliografia existente, a concepção e desenvolvimento de alguns sistemas aeradores em funcionamento em vertedores. Foram apresentadas algumas expressões matemáticas empíricas, as quais tentam descrever o mecanismo de aeração em vertedores.

O canal da bancada tinha 0,20 m de largura, 0,36 m de altura e 5,0 m de comprimento, com ângulos de atuação do canal variável (α) de 3, 14, 30, 45 e 50 graus de inclinação e ângulos de lançamento (θ) de 3, 14, 30 e 45 graus. A construção do corpo do canal foi feita em acrílico, incluindo-se piezômetros para medição de pressão ao longo do canal.

A partir da obtenção dos dados através do modelo físico reduzido, CARVALHO (1997) elaborou comparações com os mesmo. Estas comparações foram:

- Crítica ao funcionamento da bancada experimental;
- Comparações com as expressões encontradas em suas referências bibliográficas, agrupando-as em $\beta_{\max} = \beta_{\max}(\alpha, \theta, Fr)$ e $\beta_{\max} = \beta_{\max}(\lambda j)$.
Considerando esta ultima satisfatória para elaboração de análises preliminares;
- Comparações com outros trabalhos elaborados para investigar os sistemas de admissão de ar;
- Comparações entre as diversas alternativas ensaiadas.

O início da auto-aeração em vertedores ocorre quando a camada limite provocada pelo fundo do canal encontra-se com a lâmina superficial livre do escoamento, segundo Lane, *appud* REIN (1998). A partir do encontro da camada limite com a superfície do escoamento livre, ocorre a formação de turbulências responsáveis pela entrada de ar. Estas turbulências só ocorrem quando o número de Weber é muito grande e o número de Froude é maior que 1. Segundo REIN (1998), o mecanismo causador da ejeção das bolhas de um escoamento turbulento em canal aberto não é claro, as flutuações da velocidade causadas pela turbulência não seriam suficiente para provocar a interação entre a superfície livre e os turbilhões.

Com estudos focados em redes coletoras de esgoto, TSUTIYA (1999), descreve o processo físico de aeração natural detalhadamente. Após o encontro da camada limite com a superfície do fluido, existe lançamento de bolhas do fluido,

induzindo a entrada de ar no escoamento. Segundo o mesmo, esta, ocorre na seguinte seqüência, segundo TSUTIYA (1999):

- a. A gota esférica de fluido colide aproximadamente perpendicular à superfície do escoamento;
- b. Após a colisão com a superfície, a mesma torna-se achatada, quebrando a tensão superficial, abrindo uma cavidade na superfície;
- c. Inicia-se a formação do anel na periferia da cavidade;
- d. Sob influência da tensão superficial, é iniciado o fechamento do anel;
- e. O fechamento do anel forma uma bolha de ar, aprisionando o volume de ar contido no anel.

Figura 26. Seqüência formação de uma bolha de ar pela queda de uma gota d'água. Fonte: TSUTIYA (1999)

- f. A energia cinética remanescente na bolha, faz com que a mesma adentre ao escoamento, segundo TSUTIYA (1999), ficando sob influência principalmente do empuxo de Arquimedes e tensões turbulentas.

Segundo NIE (2001) os danos causados pela cavitação ocorrem freqüentemente no final da curvatura de jusante de rápido de extravasor, ao encontrar macrorrugosidades de fundo, causando grandes pressões negativas. A força centrípeta que ocorre neste ponto do extravasor contribui para o aumento das pressões negativas. Os danos causados pela cavitação no final da curvatura podem ser reduzidos se houver uma rugosidade uniforme a montante na superfície do extravasor.

NIE (2003), realizou investigações experimentais em aeradores com um forte lançamento vertical e alargamento lateral, dando ênfase à construção de um defletor no muro lateral colocado após as cavidades laterais e de fundo, distribuição de pressões e densidade de aeração. Os mesmos concluem que se a cavidade de fundo for afetada por correntes de recirculação, a eficiência do aerador poderá ser reduzida, sendo que um grande defletor é mais eficiente para o aumento dos comprimentos das cavidades de fundo e lateral, aumentando sua eficiência.

BOES (2003-1), realizou estudos em modelos físicos reduzidos em extravasores em degraus, com a finalidade de investigar os efeitos de escala em modelação física reduzida de escoamento aerado sobre descarregadores em degraus, o ponto inicial da aeração, concentração do ar e a distribuição de velocidades. O mesmo concluiu que a profundidade disponível da concentração de ar é expressa como uma função da distância vertical da crista do vertedor até o ponto de interesse no rápido do descarregador em degraus e a distribuição de

velocidades torna-se praticamente constante após 80% da mistura normalizada de ar na água ($C=0,90$).

BOES (2003-2), a partir do estudo anteriormente descrito, estudou formas de projeto de extravasores em degraus, visando a redução das dimensões das bacias de dissipação. Como conclusão deste, foi apresentado um roteiro de cálculo o qual identifica o ponto de entrada de ar, a espessura da lâmina d'água normalizada e o potencial erosivo a jusante na saída do extravasor.

TERAGUCHI (2005) cita em seu trabalho um caso ocorrido com o extravasor da barragem da Usina Hidroelétrica de Ilha Solteira, onde ocorreu cavitação devido à formação de vórtice junto aos blocos defletores dissipadores de energia, localizados a jusante do vertedor da mesma. Para estudo e solução do problema, foram elaborados dois modelos físicos reduzidos bidimensionais na escala 1:20 e 1:50, visando determinar a aeração necessária para mitigação dos mesmos.

O vórtice formado era do tipo ferradura, em decorrência do descolamento da camada limite junto ao dentes defletores dissipadores de energia. O mesmo produz um gradiente negativo de pressão suficientemente elevado para a formação de cavitação.

Nos modelos físicos reduzidos verificou-se a possibilidade de adoção de um dispositivo antivórtice ao invés de aeradores. Foram estudadas e ensaiadas cinco alternativas para redução da cavitação no vertedor, variando entre elas o formato da concordância instalada entre o paramento e os dentes defletores. A alternativa escolhida previa um dispositivo antivórtice em arco de elipse a montante do bloco defletor. TERAGUCHI (2005) conclui que o resultado desta pesquisa foi a adoção de um dispositivo antivórtice de implantação mais econômica se comparado à estrutura aeradora inicialmente proposta.

Através da presente análise bibliográfica, foi possível levantar que o início do desenvolvimento de perfis otimizados para vertedores se deu no final do século XIX, tendo em Bazin seu principal expoente. Conforme foram implantados tipos mais eficientes de vertedores, foram surgindo as deficiências dos mesmos, sendo o trabalho específico sobre aeração mais antigo encontrado foi HICKOX (1944) *appud* CHOW (1959), além de valiosas contribuições para a mitigação dos problemas de cavitação em vertedores de CREAGER (1945) e PETERKA (1953).

O grande desenvolvimento dos dispositivos aeradores se deu a partir da década de 1970, tendo o ápice de desenvolvimento na década de 1980. Os trabalhos que dão maior contribuição para o desenvolvimento da aeração em vertedores são: PINTO (1988), JANSEN (1988) e WOOD (1991), sendo significativas as pesquisas realizadas pelo Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH-USP) nos anos 70 e 80. Apesar da contribuição dos mesmos, as pesquisas até então realizadas têm como base estudos experimentais com os resultados analisados principalmente por correlação.

Os trabalhos publicados a partir do início dos anos 90 apenas seguiram a linha dos trabalhos até então existentes. O principal objetivo dos mesmos foi validar, por meio de ensaios experimentais, as equações anteriormente propostas pela bibliografia.

4. MODELAGEM

4.1. Colocação do Problema

Uso de dispositivos aeradores, assim como já descrito em capítulos anteriores, vem tornando-se difundido ao longo dos tempos, devido sua eficiência no controle da erosão em estruturas de concreto submetidas a escoamento em alta velocidade. A utilização em estruturas novas é responsável por grande redução de custos na implantação devido à diminuição do tamanho da estrutura e conseqüentemente redução no volume de concreto utilizado. Em estruturas já existentes, apresenta-se como um dos métodos mais eficientes para mitigação de problemas ocorridos devido à cavitação.

Segundo levantado através da análise bibliográfica, o desenvolvimento de estruturas aeradoras iniciou-se por volta dos anos de 1940, sendo dimensionadas apenas com base em informações colhidas nos modelos físicos reduzidos, porém estes não são representações fiéis aos seus protótipos. Com o desenvolvimento dos aeradores surgiram os modelos matemáticos, porém estes têm origem empírica, não contendo os fundamentos físicos necessários para maiores desenvolvimentos.

De acordo com a análise bibliográfica aqui exposta, existe uma lacuna quanto à existência de um modelo matemático conceitual de simples utilização para a determinação da relação entre a vazão de ar e de água. A elaboração de um modelo conceitual pode contribuir com futuros desenvolvimentos matemáticos dos aeradores, tendo em vista que tal desenvolvimento não é possível ser feito através de modelos matemáticos de origem empírica.

4.2. Identificação dos Princípios da Física

A Mecânica dos Flúidos (e por extensão a Hidráulica) pode ser estruturada com base em quatro princípios da Física:

- Conservação de massa;
- Quantidade de movimento;
- Primeira Lei da Termodinâmica;
- Segunda Lei da Termodinâmica.

Outras leis particulares também podem ser requeridas para o desenvolvimento dos modelos matemáticos.

No presente problema três leis particulares serão necessárias:

- Fórmula Universal de perda de carga distribuída;
- Fórmula de perda de carga localizada;
- Fórmula da cinemática da partícula.

Na modelação deste dispositivo aerador apenas os princípios de Conservação de Massa e Primeira Lei da Termodinâmica serão utilizados.

4.2.1. Conservação de Massa

O modelo aqui sugerido considera que não há perda e nem ganho de massa dentro do volume de controle, ou seja, tudo que entra na seção de controle à montante, sai na seção de controle a jusante. Em sua forma mais geral expressa-se, com apoio do teorema de Reynolds, como a seguinte equação integral (35).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \rho dV + \int_{S_c} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (35)$$

Onde:

- A = Área;
- S_c = Superfície de controle;
- t = Tempo;
- $\vec{v}$ = Vetor velocidade;
- V = Volume;
- V_c = Volume de controle;
- ρ = Massa específica do fluido.

4.2.2. Primeira Lei da Termodinâmica

A Primeira Lei da Termodinâmica trata do balanço de energia, trabalho e calor existente dentro do volume de controle. Este princípio da física pode ser descrito matematicamente na equação (36), onde a somatória das taxas de calor e trabalho é igual a somatória da taxa de energia dentro do volume de controle mais o fluxo da energia que passa através da superfície de controle.

$$\frac{\delta Q}{dt} + \frac{\delta W}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} e dV + \int_{S_c} \rho e \vec{v} \cdot d\vec{A} \quad (36)$$

$$e = \left(gz + \frac{1}{2} v^2 + u \right) \quad (37)$$

- ↑ Energia potencial por unidade de massa.
- ↑ Energia cinética por unidade de massa;
- ↑ Energia interna por unidade de massa;

Onde:

A	=	Área da seção de controle;
e	=	Energia por unidade massa;
g	=	Aceleração gravitacional;
S_c	=	Superfície de controle;
t	=	Tempo;
v	=	Velocidade média do escoamento;
$\vec{v}$	=	Vetor velocidade;
V	=	Volume;
V_c	=	Volume de controle;
z	=	Distância no plano vertical a partir de um ponto de referência;
δQ	=	Variação do calor;
δW	=	Variação do trabalho;
ρ	=	Massa específica.

4.3. Identificação das Leis Particulares

4.3.1. Fórmula Universal da Perda de Carga Distribuída

De forma complementar à equação de Bernoulli, faz-se necessário a determinação da perda de carga no interior da tubulação de ar para os aeradores. Dentre as várias equações existentes, foi escolhido a fórmula proposta por Darcy-Weisbach, equação (38), devido ao fato de a mesma ser uma formulação de origem conceitual.

$$\Delta H_d = f_a \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (38)$$

Onde:

D = Diâmetro da tubulação de adução;

f_a = Fator de atrito da tubulação;

g = Aceleração gravitacional;

l = Comprimento da tubulação;

v = Velocidade média do escoamento;

ΔH_d = Perda de carga distribuída.

4.3.2. Fórmula da Perda de Carga Localizada

A fórmula Universal é válida somente para tubulações prismáticas, não abrangendo as singularidades existentes na mesma. A perda de carga causada pela passagem do escoamento através de uma singularidade, pode ser calculada pela equação (39).

$$\Delta H_l = k \frac{v^2}{2g} \quad (39)$$

Onde:

D = Diâmetro da tubulação de adução;

g = Aceleração gravitacional;

k = Coeficiente de perda de carga localizada;

v = Velocidade média do escoamento;

ΔH_l = Perda de carga localizada.

4.3.3. Fórmula da Cinemática da Partícula

Ao chegar no aerador, o jato é lançado sobre o mesmo. Para o cálculo do lançamento é necessário utilizar a Fórmula da Cinemática da Partícula (40). Esta fórmula descreve o deslocamento em função do tempo de uma partícula sob ação de uma aceleração.

$$S = S_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad (40)$$

Onde:

a = Aceleração;

t = Tempo;

v_0 = Velocidade inicial;

S = Posição;

S_0 = Posição inicial;

4.4. Identificação das Grandezas Intervenientes

A = Área da seção de controle onde há fluxo;

B = Largura do canal;

C_a = Coeficiente de vazão de ar do aerador;

D = Diâmetro da tubulação de adução;

e_0 = Espessura do jato no ponto de lançamento;

f_a = Fator de atrito da tubulação;

g = Aceleração gravitacional;

g' = Aceleração gravitacional fictícia;

- i = Declividade longitudinal do leito;
 L_j = Comprimento do jato;
 l = Comprimento do tubo de adução de ar do aerador;
 k = Somatória dos coeficientes de perdas locais no aerador;
 p = Pressão sob o jato;
 p_{atm} = Pressão atmosférica;
 Q_a = Vazão de ar do aerador;
 Q_w = Vazão de água;
 t = Tempo;
 v_a = Velocidade do ar no aerador;
 v_j = Velocidade do jato sobre o aerador;
 x = Distância no plano horizontal a partir de um ponto de referência;
 y = Posição vertical do jato no instante t ;
 z = Distância no plano vertical a partir de um ponto de referência;
 α = Ângulo de deflexão do aerador em relação ao plano horizontal;
 β = Coeficiente de aeração $\left(\frac{Q_a}{Q} \right)$;
 ΔH = Perda de carga distribuída no aerador;
 Δz = Altura do degrau do aerador;
 ρ_a = Massa específica do ar;
 ρ_w = Massa específica da água.

4.5. Adoção de Hipóteses Simplificadoras

4.5.1. Fluido Incompressível

A consideração da incompressibilidade da água, não causa diferenças significativas no resultado, pois não haverá eventos, como ondas de choque.

4.5.2. Tensão de Cisalhamento Nula ($\tau_o = 0$)

Considera-se a partir desta hipótese que a água é um fluido perfeito.

4.5.3. Distribuição Hidrostática de Pressões

Hipótese simplificadora com a qual despreza-se a distribuição real por não ter influência significativa no resultado.

4.5.4. Perdas de carga sob o jato

Em função do aumento da área do escoamento, conseqüentemente ocorrendo a redução da velocidade do escoamento de ar, sob o jato do aerador, será desprezada a perda de carga neste local. As perdas de carga do escoamento de ar serão consideradas apenas no interior dos tubos de adução.

4.5.5. Não há variação temporal da vazão (Escoamento permanente)

A vazão é constante, a taxa de variação temporal da massa do volume de controle é igual a zero.

4.5.6. Tubos simétricos de Adução de Ar

É considerado que os tubos de adução de ar são simétricos, ou seja, a perda de carga é a mesma nos tubos.

4.6. Desenvolvimento do Modelo Matemático Propriamente Dito

Figura 27. Desenho esquemático do aerador a ser modelado matematicamente.

O objetivo deste desenvolvimento é a obtenção de um modelo matemático da relação entre vazão de água e vazão de ar (β) ocorrido em um aerador de barragens, conforme mostrado na figura 27.

4.6.1. Equacionamento da Vazão de Ar

Para a obtenção da vazão de ar faz-se necessário a aplicação da Primeira Lei da Termodinâmica, já simplificada de acordo com as hipóteses descritas no item 4.5, na forma da Equação de Bernoulli, para o volume de controle que coincide com o aerador:

$$\frac{p_{atm}}{\rho_a g} + \frac{v_a^2}{2g} = \frac{p}{\rho_a g} + \frac{v_a^2}{2g} + \Delta H + k \frac{v_a^2}{2g} \quad (41)$$

Adotando-se $p_{atm} = 0$ e simplificando a equação (41):

$$\cancel{\frac{p_{atm}}{\rho_a g}} + \cancel{\frac{v_a^2}{2g}} = \frac{p}{\rho_a g} + \cancel{\frac{v_a^2}{2g}} + \Delta H + k \frac{v_a^2}{2g} \quad (42)$$

$$-\frac{p}{\rho_a g} = \left(\Delta H + k \frac{v^2}{2g} \right) \quad (43)$$

Substituindo-se na equação (43) os termos da perda de carga da fórmula universal (38) e das perdas localizadas (39), tem-se:

$$-\frac{p}{\rho_a g} = \frac{8Q_a^2}{\pi^2 D^4 g} \left(\frac{f_a l}{D} + k \right) \quad (44)$$

Simplificando os termos que aparecem em ambos lados:

$$\cancel{-\frac{p}{\rho_a g}} = \frac{8Q_a^2}{\pi^2 D^4 \cancel{g}} \left(\frac{f_a l}{D} + k \right) \quad (45)$$

$$-\frac{p}{\rho_a} = \frac{8Q_a^2}{\pi^2 D^4} \left(\frac{f_a l}{D} + k \right) \quad (46)$$

Define-se o coeficiente de perda de carga do aerador (C_a) como:

$$\frac{1}{C_a^2} = \left(\frac{f_a l}{D} + k \right) \quad (47)$$

Substituindo-se (47) em (46):

$$-\frac{p}{\rho_a g} = \frac{Q_a^2}{2 \left(\frac{\pi D^2}{4} \right)^2} \left(\frac{1}{C_a^2} \right) \quad (48)$$

Rearranjando-se os termos, tem-se a equação da vazão de ar do aerador:

$$Q_a = C_a \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) \sqrt{-\frac{2p}{\rho_a}} \quad (49)$$

Onde:

C_a = Coeficiente de vazão de ar do aerador;

D = Diâmetro da tubulação de adução;

p = Pressão sob o jato;

Q_a = Vazão de ar do aerador;

ρ_a = Massa específica do ar.

4.6.2. Equacionamento Velocidade do Jato

A vazão de água “ Q ” pode ser expressa em termos da velocidade “ v_j ” com que o jato de água é defletido. Esta velocidade, por sua vez, pode ser obtida através do uso da Fórmula da Cinemática da Partícula (40). Adaptando-se esta para o lançamento da partícula, são obtidas as equações da balística:

$$x = (v_j \cos \alpha) t \quad (50)$$

$$y = (v_j \sin \alpha) t - \frac{1}{2} g' t^2 \quad (51)$$

Onde:

- g' = Aceleração gravitacional fictícia;
 t = Tempo;
 v_j = Velocidade do jato de água sobre o aerador;
 x = Distância no plano horizontal a partir de um ponto de referência;
 y = Posição vertical do jato no instante t ;
 α = Ângulo de deflexão do aerador em relação ao plano horizontal.

Colocando-se o tempo em evidência na equação (50) obtém-se:

$$t = \frac{x}{v_j \cos \alpha} \quad (52)$$

Elevando-se ao quadrado ambos os term-se:

$$t^2 = \frac{x^2}{v_j^2 \cos^2 \alpha} \quad (53)$$

Substituindo-se (53) em (51), obtém-se:

$$y = \frac{v_j \sin \alpha}{v_j \cos \alpha} x - \frac{1}{2} g' \frac{x^2}{v_j^2 \cos^2 \alpha} \quad (54)$$

Reescrevendo-se os term-se:

$$y = x \tan \alpha - \frac{1}{2} g' \frac{x^2}{v_j^2 \cos^2 \alpha} \quad (55)$$

A aceleração (g') não é exatamente a aceleração gravitacional, trata-se de uma aceleração fictícia que, além da aceleração gravitacional incorpora também o efeito da pressão sob o jato (p), que sendo negativa, propicia uma deflexão mais

acentuada da trajetória do jato. Mais adiante será obtida uma expressão analítica para a aceleração fictícia.

O jato volta a incidir sobre o fundo do canal no ponto:

$$x = L_j \quad (56)$$

$$y = -(\Delta z + iL_j) \quad (57)$$

Com a substituição de (56) e (57) em (55), tem-se:

$$-(\Delta z + iL_j) = L_j \tan \alpha - \frac{1}{2} g' \frac{L_j^2}{v_j^2 \cos^2 \alpha} \quad (58)$$

Colocando-se a velocidade do jato em evidência:

$$v_j = \sqrt{\frac{g' L_j^2}{2[L_j(\tan \alpha + i) + \Delta z] \cos^2 \alpha}} \quad (59)$$

4.6.3. Aceleração Fictícia g'

Por simplificação despreza-se a curvatura do jato e expressa-se a força aplicada pela pressão “ p ” contra o jato pela equação (60).

$$pBL_j \sqrt{1 + i^2} \quad (60)$$

Esta força é perpendicular ao fundo do canal. A componente desta força na direção vertical é “ pBL_j ”. Se esta força for concebida como um efeito da diferença em ação gravitacional real e ação gravitacional fictícia, pode-se conceber a equação (61).

$$pBL_j \cong \rho_w(g - g')L_jBe_0 \quad (61)$$

Simplificando-se, tem-se a equação (62):

$$g' \cong g - \frac{p}{\rho_w e_0} \quad (62)$$

Substituindo-se a equação (62) em (59), para a eliminação de “ g' ”, e rearranjando-se, tem-se:

$$v_j = \frac{L_j}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\rho_w g e_0 - p}{2[L_j(\tan \alpha + i) + \Delta z]\rho_w e_0}} \quad (63)$$

4.6.4. Equacionamento da Vazão de Água (Q_w)

A equação de conservação de massa, aplicando-se as hipótese descritas no item 4.5, obtém-se a equação da Continuidade (64). Esta descreve a conservação de massa utilizado apenas três parâmetros, tornando mais fácil sua utilização.

$$Q = vA \quad (64)$$

Onde:

A = Área da seção de controle;

Q = Vazão do escoamento que entra na seção de controle;

v = Velocidade média do escoamento.

Considerando-se a equação da continuidade (64), podem-se expressar a vazão de água em função dos dados do jato:

$$Q_w = v_j B e_0 \quad (65)$$

Substituindo-se (65) em (64), tem-se:

$$Q_w = \frac{BL_j e_0}{\cos \alpha} \sqrt{\frac{\rho_w g e_0 - p}{2[L_j(\tan \alpha + i) + \Delta z] \rho_w e_0}} \quad (66)$$

Onde:

- B = Largura do canal;
- e_0 = Espessura do jato no ponto de lançamento;
- g = Aceleração gravitacional;
- i = Declividade longitudinal do leito;
- L_j = Comprimento do jato;
- p = Pressão sob o jato;
- Q_w = Vazão de água;
- Δz = Altura do degrau do aerador;
- ρ_w = Massa específica da água.

4.6.5. Coeficiente de aeração

Faz-se a razão entre as equações (49) e (66) para se obter:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = \frac{C_a \pi D^2 \cos \alpha}{4BL_j e_0} \sqrt{\frac{-4p\rho_w e_0[L_j(\tan \alpha + i) + \Delta z]}{\rho_a(\rho_w g e_0 - p)}} \quad (67)$$

Simplificando-se:

$$\beta = \frac{Q_a}{Q_w} = \frac{C_a \pi D^2 \cos \alpha}{4BL_j e_0} \sqrt{\frac{-4p[L_j(\tan \alpha + i) + \Delta z]}{\rho_a \left(g - \frac{p}{\rho_w e_0} \right)}} \quad (68)$$

Considerando-se que os dispositivos aeradores, normalmente são alimentados por mais de um tubo adutor, e que a equação acima proposta considera apenas um aerador, faz-se necessário multiplicar-se pela quantidade de aeradores disponíveis. Em consequência, obtém-se:

$$\beta = \frac{nQ_a}{Q_w} = \frac{nC_a \pi D^2 \cos \alpha}{4BL_j e_0} \sqrt{\frac{-4p[L_j(\tan \alpha + i) + \Delta z]}{\rho_a \left(g - \frac{p}{\rho_w e_0} \right)}} \quad (69)$$

Onde:

B = Largura do canal;

C_a = Coeficiente de vazão de ar do aerador;

D = Diâmetro da tubulação de adução;

e_0 = Espessura do jato no ponto de lançamento;

g = Aceleração gravitacional;

i = Declividade longitudinal do leito;

L_j = Comprimento do jato;

n = Número de aeradores;

p = Pressão sob o jato;

Q_a = Vazão de ar do aerador;

Q_w = Vazão de água;

β = Coeficiente de aeração $\left(\frac{Q_a}{Q} \right)$;

Δz = Altura do degrau do aerador;

ρ_a = Massa específica do ar.

ρ_w = Massa específica da água.

4.7. Análise de Consistência

Para a validação da equação (69) podem-se verificar as seguintes condições:

- Os dois membros são dimensionalmente homogêneos, no caso, ambos adimensionais;
- Quando a pressão é zero sob o jato, o valor de β também é zero;
- Quando não existe lançamento ($L_j = 0$), não existe cavidade sob o escoamento, tornando o valor de β nulo;

4.8. Validação Preliminar do Modelo

4.8.1. Barragem de Atibainha – Vertedor Tulipa

O vertedor tulipa da barragem de Atibainha, como já exposto no capítulo 3, foi ensaiado no Centro Tecnológico de Hidráulica da USP no início dos anos de 1970. Tal trabalho foi escolhido em virtude da grande quantidade de dados sobre aeração contida nos relatórios, e também como forma de validação em vertedores tulipas.

Apesar da grande quantidade de dados, os mesmos tiveram que ser tratados com a finalidade de poderem ser utilizados no modelo matemático proposto. Os dados obtidos através dos tratamentos foram a espessura do escoamento, pressão de sucção, coeficiente de vazão de ar e ângulo de lançamento do jato.

A espessura do escoamento foi estimada a partir da carga sobre a crista do vertedor, obtida através da curva de descarga do mesmo. Foi adotado um coeficiente de descarga de 0,45 sobre a carga disponível sobre a crista do vertedor, entre a crista e o aerador foi considerado que o escoamento passa por um trecho em

queda livre, sem perda de carga. Com a velocidade estimada através da equação de Chezy, através da equação da continuidade é possível estimar a espessura de escoamento.

Devida a pressão de sucção não ser medida diretamente sobre a cavidade, foi necessário a adoção de um ponto medido de pressão, que fosse o mais próximo da mesma. Foram escolhidas as tomadas de pressão 10 e 23 (vide figura 10), sempre considerando a que tivesse a pressão menor.

Tabela 2. CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO

Constantes		
C	0,85	(-)
D	0,2	m
nD	12	un
B	9,4245	m
α	0,001	Rad
i	0	m/m
ρ_w	1000	kg/m ³
ρ_a	1,205	kg/m ³
Δz	0	m
g	9,81	m/s ²

Tabela 3. CALCULO DA ESPESSURA DE ESCOAMENTO

Q (m ³ /s)	Soleira (m)	Nível (m)	Carga (m)	V (m/s)	A (m ²)	e (m)
8	787	787,404	0,404	9,63	0,83	0,09
20	787	787,739	0,739	10,09	1,98	0,21
35	787	787,943	0,943	10,31	3,39	0,36
55	787	788,298	1,298	10,66	5,16	0,55
73	787	788,542	1,542	10,86	6,72	0,71

Devido à falta de dados relativos à perda de carga nas tomadas de ar do aerador e geometria do mesmo, será adotado o valor do coeficiente de vazão de ar. Esta adoção será feita de modo que a curva do modelo fique próxima à curva de ensaio.

O aerador, segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1971-1) não conta com defletores, fazendo com que o escoamento passe verticalmente sobre o aerador. Considerando-se o fato que tangente de $\frac{\pi}{2}$ tende ao infinito, foi adotado um ângulo “um pouco” menor que $\frac{\pi}{2}$. O critério de adoção do cosseno o mais próximo de 1 deve-se ao fato que a distância de lançamento considerada é igual ao comprimento do aerador, devido o escoamento estar em queda livre.

Tabela 4. CALCULO DE β COM 12 E 6 AERADORES ABERTOS

Qw (m³/s)	L (m)	p (Pa)	e (m)	β	
				Aeradores	
				12	6
8	1,05	-350	0,09	0,11	0,05
20	1,05	-460	0,21	0,06	0,03
35	1,05	-810	0,36	0,04	0,02
55	1,05	-4620	0,55	0,06	0,03
73	1,05	-25040	0,71	0,06	0,03

O dispositivo aerador possui 12 tomadas de ar ligadas com a atmosfera. Foram realizados dois tipos de ensaios distintos: com 12 aeradores (tomadas) abertos e com 6 aeradores abertos.

Através do gráfico (figura 28) podemos notar que, apesar de o modelo matemático não obedecer perfeitamente o comportamento dos dados de ensaio em modelo reduzido, houve uma proximidade entre os mesmos. As diferenças podem ser atribuídas ao grande número de considerações atribuídas aos dados de ensaio a fim de poderem ser lançados no modelo matemático aqui proposto, devido ao fato que estes ensaios não tiveram como finalidade o desenvolvimento de modelação matemática, apenas o comportamento aproximado do aerador. A semelhança física precária, como já descrito no capítulo 3, também pode ser um fator relevante.

Figura 28. Comparação entre dados do modelo matemático e dados dos ensaios

4.8.2. Barragem de Cachoeira – Vertedor Tulipa

A barragem de Cachoeira faz parte do mesmo sistema de barragens à Atibainha. Os vertedores tulipa de ambas foram ensaiados no Centro Tecnológico de Hidráulica CTH-USP no início dos anos 70. Em função disto, os projetos e ensaios realizados apresentam grandes similaridades, inclusive na detecção da necessidade de aeração como forma de mitigar os efeitos da cavitação, conforme apresentado no capítulo 3.

Os dados de Cachoeira foram medidos em ensaios através dos mesmos métodos e considerações feitos em relação aos dados de Atibainha. Estes necessitaram ser tratados com a finalidade de poderem ser inseridos no modelo matemático proposto. Os dados referentes à pressão, à espessura do escoamento,

à distância de lançamento e ao coeficiente de aeração do aerador necessitaram de tratamento.

Tabela 5. CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO

Constantes		
C	0,55	(-)
D	0,26	m
nD	12	un
B	12,566	m
α	0,01	Rad
i	0	m/m
ρ_w	1000	kg/m ³
ρ_a	1,205	kg/m ³
Δz	0	m
g	9,81	m/s ²

Tabela 6. CÁLCULO DA ESPESSURA DE ESCOAMENTO

Q (m ³ /s)	Soleira (m)	Nível (m)	Carga (m)	v (m/s)	A (m ²)	e (m)
45,0	821,5	822,86	1,36	14,90	3,02	0,24
90,0	821,5	822,86	1,36	14,90	6,04	0,48
135,0	821,5	822,39	0,89	14,45	9,34	0,74
173,0	821,5	823,55	2,05	15,45	11,20	0,89
177,0	821,5	823,66	2,16	15,52	11,40	0,91
185,9	821,5	824,8	3,3	16,23	11,46	0,91

Os tratamentos foram semelhantes entre ambos vertedores, variando apenas os dados de entrada. O comprimento da faixa aerada também considera o escoamento em queda livre, porém varia conforme a variação geométrica das estruturas. O coeficiente de aeração também foi adaptado de forma que os dados fossem os mais próximos possíveis dos dados de modelo, em função da falta de informação quanto à geometria das tomadas de ar.

Tabela 7. CÁLCULO DE β COM 12 E 8 AERADORES ABERTOS

Q _w (m ³ /s)	L (m)	p (Pa)	e (m)	β	
				Aeradores	
				12	8
45	1,6	-70	0,24	0,04	0,03
90	1,6	-70	0,48	0,02	0,01
135	1,6	-3380	0,74	0,08	0,06
173	1,6	-13690	0,89	0,11	0,07

A figura 29 faz a comparação entre os dados obtidos no ensaio e os calculados através do modelo matemático proposto. Os dados, tanto ensaiados quanto calculados apresentam a mesma tendência. Apesar dos ensaios cujo dados foram obtidos não tiveram o objetivo de desenvolvimento de modelos matemáticos, sendo necessária a adaptação dos mesmos, houve uma grande similaridade entre as curvas obtidas dos ensaios e as curvas calculadas.

Figura 29. Comparação entre dados do modelo matemático e dados dos ensaios

4.9. Reformulação do Modelo

Em virtude do comportamento das curvas de aeração serem similares e próximas das curvas obtidas em ensaios, mesmo sendo modelos que fogem às hipóteses inicialmente adotadas, não será feita reformulação no modelo. O modelo

foi concebido para paramento de vertedores do tipo Creager (ou similar), porém foi possível notar que o mesmo apresentou bons resultados quando utilizado para vertedores do tipo Tulipa.

Foi possível notar que as vazões menores, conseqüentemente pressões negativas menores, implicam maiores erros relativos entre os dados medidos e calculados. Os ensaios descritos anteriormente foram realizados utilizando-se piezômetros com medição visual, devido à experiência do autor em modelação física reduzida nos laboratórios do Centro Tecnológico de Hidráulica CTH-USP, foi levantada a possibilidade de os dados de pressão com menor variação sofrerem incertezas em sua leitura em função da atuação da tensão superficial dentro dos piezômetros.

5. VALIDAÇÃO AMPLA DO MODELO

5.1. UHE Pedra do Cavalo

Conforme já citado no capítulo 3, no vertedor da UHE Pedra do Cavalo existem dois aeradores seqüenciais, de forma muito similar a modelação proposta nesta dissertação. Os ensaios foram realizados no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH-USP) no início dos anos de 1980, gerando grande quantidade de dados, porém, assim como nos vertedores tulipa anteriormente citados, este não teve a preocupação de gerar dados para estudos futuros, sendo necessário fazer algumas considerações.

Analisando-se o “*as built*” (figura 23) do vertedor da barragem de Pedra do Cavalo, é possível notar algumas diferenças entre a opção ensaiada escolhida do modelo e o protótipo. As principais diferenças encontradas são a geometria das tomadas de ar, as quais não são consideradas no modelo ensaiado, e a adoção de defletores nos aeradores no protótipo.

A geometria das tomadas de ar constam do “*as built*”, sendo entradas de formato retangular, sendo necessário adaptá-las às condições do modelo proposto. Para esta adaptação foi considerado que o diâmetro hidráulico da tomada de ar é quatro vezes superior ao raio hidráulico da mesma, tornando a mesma de geometria circular para efeito de cálculo, resultando em um diâmetro hidráulico de 2,00 metros.

Os ensaios não utilizaram rampas defletores, conforme utilizadas no protótipo, as quais aumentam a eficiência da aeração. Para fins de estimativa da vazão de ar real do vertedor considerado, nas avaliações do modelo foram consideradas as

rampas de modelo, assim como o degrau adotado segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982) de 1,00 m em ambos aeradores.

As pressões da cavidade sob o jato não foram medidas, sendo necessário estimar as mesmas. Assim como nos itens 4.8.1 e 4.8.2 os valores das pressões foram obtidos a partir das pressões de ensaio do vertedor sem considerar o aerador, no ponto onde os mesmos foram instalados. Não foi estudada a pressão sob a cavidade do jato neste modelo reduzido.

Apesar do CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982) citar a área molhada das tomadas de ar dos aeradores, não foi estimado um valor para o coeficiente de vazão do mesmo. Devido à ausência de dados após a obra construída, não é possível obter a curva de aeração real da estrutura, sendo este coeficiente possível estimar através do cálculo da espessura da camada limite em função da velocidade de escoamento, porém, mesmo o cálculo teórico não deixaria de ser uma estimativa. Diante disto, convencionou-se adotar o coeficiente de vazão de ar em 0,5.

Tabela 8. CONSTANTES UTILIZADAS PARA O CÁLCULO – UHE PEDRA DO CAVALO

Constantes			Unid.
	Aerador		
	1	2	
C	0,5	0,5	(-)
D	2	2	m
B	91,8	91,8	m
α	-0,2942	-0,3576	Rad
i	0,303	0,3736	m/m
ρ_w	1000	1000	kg/m ³
ρ_a	1,205	1,205	kg/m ³
Δz	1,00	1,00	m
g	9.81	9.81	m/s ²

Foram ensaiadas três configurações diferentes para cada um dos dois aeradores. A primeira configuração foi com as duas tomadas de ar de cada aerador aberta, as duas outras foram com apenas uma tomada de ar aberta, variando-se a

tomada de ar. Para este estudo, considerando-se apenas uma tomada de ar aberta, o valor estudado é a média da segunda e da terceira configuração de ensaio.

Tabela 9. CALCULO DE β - UHE PEDRA DO CAVALO

Qw (m³/s)	L (m)	p (Pa)	e (m)	β	
				Aeradores	
				1	2
Aerador 1					
1000	9,12	-11500	0,75	0,09	0,19
2000	16,00	-15500	1,05	0,04	0,09
4000	20,00	-11500	2,30	0,02	0,04
6000	19,36	-15500	3,00	0,02	0,03
9000	20,32	-18600	5,09	0,01	0,02
12000	18,40	-28200	5,25	0,01	0,03
Aerador 2					
1000	12,64	-18600	0,80	0,07	0,14
2000	17,92	-28200	1,17	0,04	0,08
4000	20,80	-18600	1,78	0,02	0,05
6000	20,32	-28200	2,30	0,02	0,05
9000	21,12	-18600	3,40	0,01	0,03
12000	18,08	-28200	4,22	0,02	0,03

Figura 30. Comparação entre dados do modelo matemático e dados dos ensaios do aerador 1 – UHE Pedra do Cavalo.

Figura 31. Comparação entre dados do modelo matemático e dados dos ensaios do aerador 2 – UHE Pedra do Cavalo.

Segundo o CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA (1982), a modelação do funcionamento dos aeradores no modelo físico reduzido de Pedra do Cavalo teve carácter qualitativo, pois “*sabe-se que os efeitos de escala nos processos de arrastamento de ar são significativos*”. Apesar disto, as curvas mostraram de comportamento similar, variando apenas os pontos iniciais provavelmente em função das incertezas de leitura da pressão.

5.2. Ensaios – CARVALHO (1997)

Como já citado no capítulo 3, CARVALHO (1997) apresentou grande quantidade de dados gerados em modelo físico reduzido reduzidos construído na Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. Os ensaios realizados a partir de um canal com geometria longitudinal variável, forneceram dados de boa qualidade e sem fatores de escala envolvidos, assim como os ensaios descritos anteriormente.

Apesar da boa qualidade das medições realizadas por CARVALHO (1997), a apresentação dos dados neste não é boa. Não foi informado o modelo esquemático com as posições de medição e algumas características geométricas do modelo, existem também dados apresentados nas tabelas que não são descritos em nenhum lugar do mesmo. Em virtude disto, foram necessários fazer algumas considerações.

Não foi mensurado em CARVALHO (1997) nem o coeficiente de vazão, nem as medidas geométricas do aerador, a fim de poder ser estimada conceitualmente através das equações (38) e (39). Devido à falta de dados o coeficiente de vazão, foi estimado a partir de figuras existentes no trabalho e as dimensões do aerador, lançando-as nas equações (38) e (39), o valor estimado foi de 0,88. Este valor serviu apenas como parâmetro inicial de cálculo, sofrendo reajuste para cada situação geométrica de cálculo.

Diante da grande quantidade de dados foi convencionado utilizar cinco dados para cada situação de cálculo. A fim de facilitar o encontro dos dados em CARVALHO (1997) foi informado o código adotado pelo mesmo na tabela 10. Este código define a geometria de cálculo do aerador ensaiado, esta geometria também consta da mesma tabela. Em CARVALHO (1997) foi apresentado o campo “gvá”

expresso em graus ($^{\circ}$), não havendo citação da função deste item, forçando a adoção de um valor característico, no caso 90° ($\pi/2$ rad).

O comprimento da faixa aerada (L_j) medido em CARVALHO (1997) em paralelo com o fundo do canal, sendo necessário adaptá-lo para o modelo aqui proposto, pois o mesmo dado é definido paralelamente ao eixo das abscissas. Esta adaptação foi feita multiplicando-se o valor obtido pelo cosseno do ângulo de inclinação do canal.

Figura 32. Gráfico de comparação entre β medido e calculado dos ensaios de CARVALHO (1997)

Tabela 10. CALCULO DE β COM DADOS DE CARVALHO (1997).

Código	Ca	I (m/m)	θ (Rad)	Degrau (m)	Qw (m³/s)	Pressão (Pa)	Lj (m)	e (m)	Qa (m³/s)	β		Erro
										medido	calculado	
11000	0,88	0,05	0,0175	0	0,0924	-90	1,52	0,055	0,031	0,34	0,33	0,01
	0,88	0,05	0,0175	0	0,1199	-40	1,12	0,083	0,022	0,18	0,16	0,12
	0,88	0,05	0,0175	0	0,1323	-70	1,22	0,084	0,029	0,22	0,21	0,05
	0,88	0,05	0,0175	0	0,1595	-140	1,57	0,084	0,038	0,24	0,27	-0,12
	0,88	0,05	0,0175	0	0,1962	-70	1,37	0,113	0,028	0,14	0,14	0,01
11100	0,95	0,05	0,0175	0,03	0,1050	-20	1,12	0,081	0,015	0,15	0,12	0,17
	0,95	0,05	0,0175	0,03	0,1211	-50	1,27	0,083	0,023	0,19	0,18	0,05
	0,95	0,05	0,0175	0,03	0,1330	-80	1,42	0,084	0,030	0,22	0,22	0,01
	0,95	0,05	0,0175	0,03	0,1714	-40	1,27	0,113	0,022	0,13	0,12	0,08
	0,95	0,05	0,0175	0,03	0,1959	-80	1,52	0,113	0,029	0,15	0,16	-0,05
21000	0,92	0,25	-0,1745	0	0,1408	-20	1,09	0,095	0,017	0,12	0,10	0,16
	0,92	0,25	-0,1745	0	0,1529	-40	1,18	0,095	0,022	0,14	0,14	0,05
	0,92	0,25	-0,1745	0	0,1620	-50	1,18	0,095	0,026	0,16	0,15	0,06
	0,92	0,25	-0,1745	0	0,1812	-70	1,38	0,095	0,033	0,18	0,17	0,09
	0,92	0,25	-0,1745	0	0,1914	-120	1,47	0,097	0,037	0,19	0,20	-0,05
21040	0,75	0,25	-0,1745	0,03	0,1048	-110	0,99	0,094	0,036	0,34	0,24	0,45
	0,75	0,25	-0,1745	0,03	0,1202	-170	1,09	0,068	0,045	0,38	0,36	0,04
	0,75	0,25	-0,1745	0,03	0,1620	-150	1,04	0,095	0,043	0,26	0,26	0,01
	0,75	0,25	-0,1745	0,03	0,1812	-210	1,09	0,095	0,051	0,28	0,29	-0,04
	0,75	0,25	-0,1745	0,03	0,1914	-250	1,09	0,097	0,054	0,28	0,31	-0,08
22000	0,72	0,25	-0,1047	0	0,0679	-40	1,28	0,045	0,021	0,31	0,30	0,03
	0,72	0,25	-0,1047	0	0,1052	-50	1,38	0,068	0,024	0,22	0,22	0,02
	0,72	0,25	-0,1047	0	0,1280	-100	1,62	0,068	0,033	0,26	0,28	-0,07
	0,72	0,25	-0,1047	0	0,1557	-70	1,47	0,095	0,028	0,18	0,18	0,01
	0,72	0,25	-0,1047	0	0,1815	-120	1,67	0,097	0,038	0,21	0,21	0,00
23000	0,85	0,25	-0,1047	0	0,0999	-80	2,64	0,047	0,036	0,36	0,33	0,09
	0,85	0,25	-0,1047	0	0,1039	-90	2,74	0,05	0,036	0,35	0,32	0,09
	0,85	0,25	-0,1047	0	0,1328	-120	2,35	0,068	0,038	0,29	0,29	-0,02
	0,85	0,25	-0,1047	0	0,1478	-140	2,64	0,07	0,042	0,29	0,29	0,00
	0,85	0,25	-0,1047	0	0,1847	-150	2,25	0,097	0,040	0,21	0,24	-0,09

Tabela 10. CALCULO DE β COM DADOS DE CARVALHO (1997). (CONTINUAÇÃO)

Código	Ca	I (m/m)	θ (Rad)	Degrau (m)	Qw (m³/s)	Pressão (Pa)	Lj (m)	e (m)	Qa (m³/s)	β		Erro
										medido	calculado	
24000	0,8	0,25	-0,0698	0	0,0773	-30	1,28	0,068	0,012	0,16	0,22	-0,29
	0,8	0,25	-0,0698	0	0,1165	-20	1,38	0,095	0,017	0,15	0,13	0,16
	0,8	0,25	-0,0698	0	0,1373	-50	1,67	0,095	0,026	0,19	0,18	0,07
	0,8	0,25	-0,0698	0	0,1575	-80	1,96	0,095	0,032	0,20	0,21	-0,02
	0,8	0,25	-0,0698	0	0,1835	-130	2,35	0,097	0,041	0,22	0,23	-0,02
31000	0,95	0,58	-0,4538	0	0,0901	-100	1,45	0,058	0,035	0,39	0,32	0,21
	0,95	0,58	-0,4538	0	0,1053	-60	1,32	0,08	0,027	0,26	0,20	0,32
	0,95	0,58	-0,4538	0	0,1199	-90	1,36	0,083	0,032	0,27	0,22	0,21
	0,95	0,58	-0,4538	0	0,1280	-110	1,40	0,086	0,036	0,28	0,23	0,20
	0,95	0,58	-0,4538	0	0,1481	-70	1,27	0,103	0,029	0,20	0,17	0,18
31100	0,95	0,58	-0,4538	0,03	0,0680	-50	1,45	0,05	0,025	0,36	0,30	0,21
	0,95	0,58	-0,4538	0,03	0,0850	-90	1,71	0,058	0,031	0,37	0,31	0,21
	0,95	0,58	-0,4538	0,03	0,0904	-100	1,84	0,058	0,033	0,36	0,31	0,17
	0,95	0,58	-0,4538	0,03	0,1295	-120	1,62	0,086	0,036	0,28	0,25	0,14
	0,95	0,58	-0,4538	0,03	0,1577	-100	1,45	0,103	0,034	0,21	0,20	0,05
41000	0,95	1,00	-0,7156	0	0,0669	-70	1,07	0,043	0,028	0,41	0,42	-0,02
	0,95	1,00	-0,7156	0	0,0790	-50	1,04	0,06	0,023	0,29	0,27	0,08
	0,95	1,00	-0,7156	0	0,1040	-90	1,11	0,067	0,031	0,30	0,31	-0,01
	0,95	1,00	-0,7156	0	0,1331	-80	1,11	0,09	0,031	0,24	0,22	0,07
	0,95	1,00	-0,7156	0	0,1478	-100	1,18	0,094	0,034	0,23	0,23	0,03
41100	0,97	1,00	-0,7156	0,03	0,0386	-20	1,04	0,039	0,014	0,37	0,30	0,21
	0,97	1,00	-0,7156	0,03	0,0781	-50	1,22	0,06	0,024	0,31	0,28	0,12
	0,97	1,00	-0,7156	0,03	0,1118	-60	1,25	0,082	0,026	0,23	0,22	0,04
	0,97	1,00	-0,7156	0,03	0,1316	-90	1,32	0,09	0,031	0,24	0,23	0,01
	0,97	1,00	-0,7156	0,03	0,1447	-110	1,39	0,094	0,035	0,24	0,24	0,01

6. DISCUSSÃO

Os dados utilizados foram obtidos a partir de bibliografias existentes, relatando quatro experimentos realizados nos laboratórios de hidráulica da Universidade de São Paulo. Foram elencados dois ensaios realizados em vertedores tulipa e dois em vertedores do tipo Creager.

Os dados de ensaios realizados em vertedores do tipo tulipa foram utilizados para a validação preliminar do modelo, tendo em vista que trata-se de um caso extremo de utilização do modelo matemático. Este modelo foi desenvolvido para aeradores posicionados no paramento de vertedores do tipo Creager, porém apresentou resultados aceitáveis para vertedores do tipo tulipa.

O modelo matemático pode ser utilizado em vertedores do tipo tulipa através de uma translação dos eixos em $-\frac{\pi}{2}$ radianos. Esta rotação faz-se necessária pois para esta condição de lançamento a tangente torna-se nula, não sendo possível obter resultados. Mesmo com a rotação de eixos, é necessário impor ao modelo ângulo mínimo, tendo em vista que segundo a modelação matemática, quando não existe lançamento do jato não existe aeração.

Para utilização dos dados no modelo matemático proposto foram necessários adaptar os mesmos. Estes não foram obtidos de forma para aplicação em trabalhos futuros, não sendo medidos os dados de pressão sob o lançamento do jato, sendo contornado considerando os dados de pressão mais próximos ao ponto de lançamento. Apesar desta condição, os dados calculados através do modelo matemático apresentaram resultados próximos, inclusive seguindo a mesma tendência da curva gerada através das medições nos modelos físicos reduzidos.

A utilização do modelo proposto em dados obtidos em modelos físicos do tipo Creager foram de simples utilização, porém é necessário atentá-se ao ângulo de lançamento do jato, pois existem duas formas de apresentação. Na primeira, o ângulo é obtido tendo como base o paramento do vertedor, mesmo este sendo inclinado. Na segunda forma, a qual é utilizada nesta modelação matemática, o ângulo é calculado tendo como base o eixo das abscissas. Para transformação dos dados tendo como base a primeira alternativa para a segunda, é necessário subtrair o ângulo de inclinação do paramento do ângulo de lançamento do jato.

Os dados do modelo dos aeradores do paramento do vertedor Creager da UHE Pedra do Cavalo sofreram dos mesmos problemas dos dados obtidos para os ensaios para dos vertedores do tipo tulipa. Foi necessário adaptar os dados existentes de forma que os mesmos pudessem ser utilizados no modelo matemático proposto. Apesar desta dificuldade, assim como nos casos anteriores, os resultados obtidos apresentaram-se muito próximo dos dados obtidos no modelo físico reduzido, inclusive apresentando a mesma tendência de curvatura.

A apresentação dos resultados obtidos com a aplicação dos dados dos modelos do vertedor tulipa de Atibainha, de Cachoeira e dos aeradores do paramento do vertedor do tipo Creager da UHE Pedra do Cavalo foram feitas comparando-se os β calculados e obtidos nos ensaios em função da vazão de água a qual os mesmos são relacionados. Para estes modelos não foi possível fazer um gráfico de comparação direta dos resultados, tendo em vista que os dados obtidos de β tinham vazões distintas dos dados de possível de utilização no modelo matemático proposto. Foi levantada a hipótese de interpolação dos dados, porém foi descartada em virtude do erro que tal hipótese geraria.

Com os dados obtidos em CARVALHO (1997) foi possível fazer análises mais precisas, tendo em vista que não foi necessário adaptar os dados obtidos nos ensaios para utilização no modelo matemático proposto, apenas houve conversões de unidades. Houve problemas apenas devido à falta de informação de alguns itens do modelo, conforme descrito no item 5.2. A partir destes dados foi possível elaborar um gráfico de comparação direta dos resultados de ensaio e obtidos no modelo matemático proposto, apresentando resultados com erro relativo menor que 0,10 em mais da metade dos casos ensaiados.

Apesar de condição *sine qua non* para aplicação no modelo matemático proposto, a adoção dos dados obtidos nas literaturas não sendo considerados como paradigmas, é necessária avaliação criteriosa da mesma. As medições nos modelos físicos reduzidos, por mais precisas, sempre podem apresentar erros em função da escala de medição envolvida. Tendo isto em foco, e considerando a pequena margem de erro apresentada, pode-se afirmar que o modelo matemático proposto é válido para sua finalidade.

7. CONCLUSÕES

Os vertedores de barragens apresentam escoamentos em alta velocidade, em função do grande desnível geométrico entre montante e jusante. A alta velocidade pode acarretar o surgimento de cavitação nesta estrutura, podendo progredir para condições catastróficas.

A cavitação é um fenômeno complexo e ainda nos dias atuais não totalmente explicado, existindo explicações diferentes para descrição do mesmo, não sendo consenso entre os diversos pesquisadores do tema. É de consenso entre todas as bibliografias analisadas, que a injeção de ar no escoamento interfere no mecanismo de implosão da bolha cavitante, reduzindo as tensões provocadas pela pulsação nas vizinhanças da mesma.

A introdução de ar no escoamento surge como alternativa para mitigação dos efeitos nocivos da cavitação, podendo ser aplicada em estruturas novas para redução das dimensões da mesma ou, em estruturas existentes sujeitas ao ataque erosivo da cavitação, adaptando-as.

Existem duas formas de aeração em vertedores, a aeração natural e a aeração induzida. A primeira ocorre em todas as estruturas, porém em função da vazão específica e da velocidade do escoamento, pode não ser suficiente para mitigação dos efeitos da cavitação. A aeração induzida tem como objetivo prover o escoamento da quantidade de ar necessária para mitigar os efeitos da cavitação, sendo uma alternativa muito eficiente e de custo inferior às outras existentes.

Para o dimensionamento dos aeradores, segundo as bibliografias existentes são propostas diversas formulações de origem empírica. A lacuna de uma

modelação matemática conceitual foi elemento inspirador para elaboração de um novo modelo.

Tal modelo foi proposto tendo como base os princípios da Conservação de Massa e a Primeira Lei da Termodinâmica. A partir de um desenvolvimento totalmente conceitual, foi obtido o modelo propriamente dito, expresso através da equação 69. A análise de consistência provou que a modelação apresenta resultados coerentes com os esperado.

A validação do modelo matemático conceitual proposto foi feita através de dados obtidos na literatura existente. Os dados obtidos tiveram comportamentos próximos aos dados obtidos nos ensaios com os modelos físicos reduzidos, podendo-se afirmar que o modelo é válido para sua finalidade.

Este modelo é uma ferramenta muito eficiente para o dimensionamento de estruturas de aeração induzida em vertedores. Tal ferramenta é de simples utilização, não requerendo rotinas de programação ou equipamentos sofisticados para cálculo. Mesmo abrindo-se mão do uso de computadores é possível obter resultados com boa qualidade e em tempo muito curto.

8. RECOMENDAÇÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

De acordo com as conclusões aqui apresentadas, é recomendado pelo autor para futuros trabalhos que abordarem o mesmo tema:

- Desenvolvimento de um modelo matemático complementar, visando a determinação de um modelo matemático para o lançamento do jato;
- Determinação do ponto de máximo da vazão de ar (Q_a) através de cálculo diferencial aplicado ao modelo neste trabalho apresentado;
- Medições em estruturas existentes e implantadas da vazão de ar em função da vazão de água e comparação com o modelo matemático proposto nesta dissertação;
- Determinação de um modelo de aerador otimizado em função das características geométricas do extravasor onde o mesmo está instalado, a partir da determinação do ponto ótimo de operação do mesmo;
- Em modelos físicos reduzidos, onde sejam previstos a adoção de aeradores, estudar a pressão da cavidade sobre o jato, o coeficiente de vazão dos aeradores e a espessura do jato lançado;
- Realização de estudo para determinação de uma escala mínima ou postulada, onde seja possível a compatibilização da aeração em modelo físico reduzido com a aeração no protótipo, mitigando os efeitos da tensão superficial do escoamento de água e do escoamento laminar de ar nos aeradores.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABECASSIS, F. M. Manzanares. **Memória: nº 175: Soleiras Descarregadoras – Alguns problemas especiais**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1961. 113p.
2. BOES, Robert M.; HAGER, Willi H.. Two-Phase Flow Characteristics of Stepped Spillways. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering**. Reston, v. 129 (9), p. 661-670, September 2003.
3. BOES, Robert M.; HAGER, Willi H.. Hydraulic Design of Stepped Spillways. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering**. Reston, v. 129 (9), p. 671-679, September 2003.
4. BORSARI, Ricardo Daruiz; BRIGHETTI, Giorgio. A cavitação por irregularidade de superfície e a aeração como forma de prevenção. **Boletim do Centro Tecnológico de Hidráulica**. São Paulo, v. 12, p. 1-17, 1989.
5. CARVALHO, Paulo Damasceno. **Aeração de Escoamento de Alta Velocidade em Canais de Forte Declividade**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 1997.
6. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Estudo em Modelo Reduzido da Barragem de Atibainha – Relatório Global**. Relatório dos Ensaios. São Paulo: DAEE/USP, 1971. 19p.
7. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Estudo em Modelo Reduzido da Barragem de Cachoeira – Relatório Global**. Relatório dos Ensaios. São Paulo: DAEE/USP, 1971. 22p.

8. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Etapá Jaguari (Sistema Cantareira) – Modelo do extravasor tulipa da barragem do Jacaréí.** Relatório dos Ensaíos. São Paulo: DAEE/USP, 1978. 36p.
9. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Pedra do Cavalo: Modelo tridimensional da barragem – Escala 1:80.** Relatório parcial nº 6. São Paulo: DAEE/USP, 1982. 25p.
10. CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA. **Relatório de Pressões Instantâneas na Bacia de Dissipação de Porto Colômbia – Modelo Bidimensional Escala 1:50.** São Paulo: DAEE/USP, 1990. 36p.
11. CHANSON, H.. Study of air entrainment and aeration devices. **Journal Of Hydraulic Reserch – International Association for Hydraulic Research.** Reston, v. 27 (3), p. 301-319, 1989.
12. CHANSON, H.. Self-Aerated Flows on Chutes and Spillways. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering.** Reston, v. 119 (2), p. 220-243, Febuary 1993.
13. CHOW, Ven Te. **Open-Channel Hydraulics.** New York: McGraw-Hill, 1959. 680p.
14. CREAGER, William P., JUSTIN, Joel D., HINDS, Julian. **Engineering for Dams.** New York: John Wiley & Sons, Inc., v1, 1945. 245p.
15. CUOMO, Angelo Raffaele; GENOVEZ, Ana Inês Borri. Estudo do arratamento de ar em poço com embocadura tipo tulipa. **Boletim do Centro Tecnológico de Hidráulica.** São Paulo, v. 11, 1987.

- 16.FALVEY, Henry T.. **Air-water flow in hydraulic structures**. Denver: United States Department of the Interior – Water and Power Resources Services, 1980. 143p.
- 17.GIKAS, Ioannis. **Tópicos de Cavitação**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 1986. 271p.
- 18.HAGER, Willi H.. **Évacuateurs. Ondes de choc et entraînement d'air**. Paris: Comité de l'Hydraulique des Barrages, 1992, Boletim 81. 117p.
- 19.HANNA, Frank W.; KENNEDY, Robert C.. **Design of Dams**. New York: MacGrow-Hill, 1938. 478p.
- 20.JANSEN, Robert B.; PINTO, Nelson L. de Souza; *et all.* **Advanced Dam Engeneering – For Design, Construction and Rehabilitation**. New York: Van Nostrand Reynold, 1988. 811p.
- 21.MARTINS, N.. **Mémoire nº 167: L' aération das lês évacuateurs em puits**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1960. 13p.
- 22.MONTEIRO, Elizandra Amaral. **Modelação matemática da queda livre**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 2006. 112p.
- 23.NETTO, José Martiniano de Azevedo. **Manual de Hidráulica**. São Paulo: Edgard Blücher, ed. 8, 1998, 669p.
- 24.NIE, Meng-Xi; WANG, Xu-Shenng; WU, Guang-Hao. Effect of Lateral Deflector on Outlet Cavity Lengths. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering**. Reston, v. 129 (7), p. 536-540, Julho 2003.

25. NIE, Meng-Xi. Cavitation Prevention with Roughened Surface. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering**. Reston, v. 127 (10), p. 878-880, october 2001.
26. OLINGER, Júlio César. **Aeração em fluxos de alta velocidade: desempenho de ejetores verticais**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 1990. 129p.
27. PETERKA, A. J.. **Spillway tests confirm model-prototype conformance**. Denver: United States Department of Interior – Bureau of Reclamation, 1953. 62p.
28. PINTO, Nelson L. de Souza. **Cavitação e Aeração em Fluxos de Alta Velocidade**. Curitiba, 28p., december 1979.
29. PINTO, Nelson L. de Souza. Noções básicas sobre cavitação e aeração em fluxos de alta velocidade – Notas de Aula (Agosto de 1983). **Associação Internacional de Pesquisas Hidráulica - Revista Latino Americana de Hidráulica**. São Paulo, v.3, p. 81-112, maio 1988.
30. PINTO, Nelson L. de Souza; NEIDERT, Sinildo H.; OTA; José J.. **Prototype and laboratory experimens on aeration at high velocity flows**. Curitiba, 23p., August 1981.
31. PORTO, Rodrigo de Melo. **Hidráulica Básica**. São Carlos: EESC-USP, ed. 3, 2004.
32. QUINTELA, A. Carvalho; RAMOS, C. Matias. **Proteção contra a erosão de Cavitação em obras hidráulicas**. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1980. 74p.

33. REIN, Martin. Turbulent Open-Channel Flows: Drop-Generation and Self-Aeration. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering**. Reston, v. 124 (1), p. 98-102, January 1998.
34. ROBERSON, John A.; CASSIDY, John J.; CHAUDHRY, M. Hanif. **Hydraulic Engeneering**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 653p.
35. RUTSCHMANN, Peter; HAGER, Willi H.. Air Entrainment by Spillway Aerators. **American Society of Civil Engineers - Journal of Hydraulic Engineering**. Reston, v. 116 (1), p. 765-782, June 1990.
36. SERRA, Paulo Celso Gonçalves. **O Uso de Dispositivos de Aeração em Vertedouros Para o Controle da Erosão por Cavitação**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo, 1986. 92p.
37. SOUZA, Podalyro Amaral (2005). **Complementos de Hidráulica 2 – Notas de Aula**. PHD 2302. São Paulo. EPUSP. 2005.
38. SOUZA, Podalyro Amaral (2005). **Complementos de Hidráulica 1 – Notas de Aula**. PHD 5725. São Paulo. EPUSP. 2005.
39. SZPILMAN, Adolfo; MEDAGLIA, Libero; NEIDERT, Sinildo Hermes. **Vertedouro de Itaipu – Dissipação de energia e outros aspectos**. XIII Seminário Nacional de Grandes Barragens. Rio de Janeiro, v 1, p. 183-206, Abril 1980.
40. TERAGUCHI, Hiroshi. **Hidráulica de um Sistema Extravasor**. Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo, 2005. 132p.

41. TSUTIYA, Milton Tomoyouki; SOBRINHO, Pedro Alem. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000. 547p.
42. UNITED STATES BUREAU OF RECLAMATION. **Cavitation in chutes and spillways**. U. S. Department of the Interior: Denver, 1990. 145p.
43. WOOD, Ian R.; *et all.* **Air Entrainment in free-surface flows**. Rotterdam: A.A. Balkema, 1991. 142p.