



*Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil*

***A Utilização de Válvulas Dispersoras Cônicas como
Dispositivo de Medição de Vazão.***

Luiz Celso Braga Pinto

*Campinas
- 1997 -*

P658u

32520/BC

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	UNICAMP
	P658u
V.	Ex
TC 30 B	32520
PROC.	395/98
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	13/01/98
N.º CPD	

CM-00104997-4

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

P658u

Pinto, Luiz Celso Braga

A utilização de válvulas dispersoras cônicas como dispositivo de medição de vazão.--Campinas, SP: [s.n.], 1997.

Orientador: José Roberto Bonilha
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Civil

1. Barragens e açudes. 2. Instrumentos de medição 3. Medição 4. Estruturas hidráulicas 5. Engenharia hidráulica. I. Bonilha, José Roberto. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil. III. Título.



***Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil
Mestrado em Recursos Hídricos***

Luiz Celso Braga Pinto

***A Utilização de Válvulas Dispersoras Cônicas como Dispositivo
de Medição de Vazão.***

***Tese apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da
Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de
Mestre em Engenharia na área de recursos hídricos .***

Orientador: Professor Doutor José Roberto Bonilha

*Atesto que esta
é a versão definitiva
desta Dissertação
José Roberto Bonilha
23-9-97*

**Campinas-SP
- 1997 -**



*Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Civil
Mestrado em Recursos Hídricos*

Luiz Celso Braga Pinto

*A Utilização de Válvulas Dispersoras Cônicas como Dispositivo
de Medição de Vazão.*

*Tese aprovada na Universidade Estadual de Campinas em
06/08/97*

Orientador: Professor Doutor José Roberto Bonilha

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Ana Inês Borri Genovez", is positioned above a horizontal line.

Prof.^a Dra. Ana Inês Borri Genovez

A handwritten signature in dark ink, appearing to read "Luis Cesar Souza Pinto", is positioned above a horizontal line.

Prof. Dr. Luis Cesar Souza Pinto

A large, stylized handwritten signature in dark ink, appearing to read "José Roberto Bonilha", is positioned above a horizontal line.

Prof. Dr. José Roberto Bonilha

Dedico este trabalho ao Prof. Dr. José Roberto Bonilha, que atenciosamente me orientou.

Consignamos nossos agradecimentos à Prof.a Dra. Ana Inês Borri Genovez, ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas(DNOCS), à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos(FUNCEME)(em especial ao mestre Rogério Campos)e ao CAPES, que, sem estes, não seria possível a realização deste trabalho.

“Não sei como o mundo me vê; mas eu me sinto como um garoto brincando na praia, contente em achar aqui e ali uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita, tendo sempre diante de mim, ainda por descobrir, o grande oceano da verdade.”

Isaac Newton(1643-1727)

SUMÁRIO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABELAS	2
PRINCIPAIS NOTAÇÕES E CONVENÇÕES	3
RESUMO	4
ABSTRACT	5
CAPÍTULO I – Generalidades	6
1.1 – Introdução	6
1.2 – Histórico	8
1.3 – Importância	11
1.4 – Justificativas	12
1.5 – Objetivos	15
1.6 – Metodologia dos Ensaios Laboratoriais	16
1.7 – Ordenação do Trabalho	18

CAPÍTULO II – Considerações Gerais	19
2.1 – A Medição das Vazões - Métodos e Aparelhos Utilizados	19
2.1.1 – Medidor de Vazão Ultrasônico	19
2.1.2 –Vertedores	20
2.1.3 – Rotâmetro	20
2.1.4 – Medidores de Deslocamento Positivo	21
2.1.5 – Medidor Venturi	22
2.1.6 – Bocal	22
2.1.7 – Orifício num Reservatório	23
2.1.8 – Medidor em Cotovelo	23
2.1.9 – Medidores de Turbina	24
2.2 – A Necessidade e a Possibilidade da Utilização de Válvulas como Dispositivos de Medição de Vazão	25
2.3 – Barragens e Descargas de Fundo	26
CAPÍTULO III – Utilização de Conceitos Teóricos	28
3.1 – Associação ao Estudo do Escoamento Através do Orifício Circular	28
3.2 – Teoria dos Erros	30
3.3 – Número de Reynolds	32
3.4 – Número de Euler	34
3.5 – Estudos em Modelos - Semelhança	36
3.6 – Coeficiente de Vazão da Válvula Dispersora Cônica	38

3.6.1 – Definição. Caso dos Jatos Livres	38
3.6.2 – Caracterização da Válvula Dispersora Cônica	40
3.6.3 – Casos em que é difícil definir-se geometricamente a área do orifício ou a passagem da água	41
3.6.4 – Coeficiente E	42
3.6.5 – Coeficiente Prático ψ	43
3.7 – Aplicação ao Caso da Válvula Dispersora Cônica	45
3.8 – O Escoamento a Potencial de Velocidades	46
3.9 – A Placa Plana. Coeficiente de Resistência em função de $\Re$	49

CAPÍTULO IV – Gerenciamento e Planejamento de Recursos Hídricos 52

4.1 – A Gestão dos Recursos Hídricos	52
4.1.1 – Crescimento Populacional e Demanda Hídrica	52
4.1.2 – O Planejamento do Balanço Hídrico do Brasil	53
4.1.3 – Política de Recursos Hídricos	54
4.2 – O Problema da Medição de Vazão no Nordeste	58
4.3 – O Projeto Mundaú	61

CAPÍTULO V – Desenvolvimento de Novos Conceitos	63
5.1 – Curva de Descarga	63
5.2 – O Efeito de Escala	67
5.3 – Avanços Sucessivos no Conhecimento do Efeito de Escala	69
5.3.1 – Primeira Etapa – Gráficos do Corps of Engineers	69
5.3.2 – Segunda Etapa – Utilização dos conceitos da mecânica dos fluidos	72
5.3.3 – Terceira Etapa – Evolução alcançada neste trabalho	75
5.4 – A Influência do Ar nas Válvulas Dispersoras Cônicas	82
5.5 – Variação do Coeficiente de Vazão com o Número de Reynolds	83
5.5.1 – Determinação de Novas Fórmulas de Efeito de Escala	83
5.5.2 – Apresentação Gráfica das Fórmulas de Efeito de Escala	86
5.5.3 – Cálculo Analítico do Coeficiente E do Açude Mundaú	87
5.5.4 – Cálculo do Número de Reynolds no Caso da Abertura Máxima da Válvula	87
5.5.5 – Confronto entre os Valores Experimentais de E e o Valor Obtido pela Fórmula de Efeito de Escala	88
5.5.6 – Cálculo das Vazões a partir do Coeficiente E Adotado	89
5.5.7 – Curvas de Descarga	89

CAPÍTULO VI – Conclusões	91
6.1 – Quanto ao Efeito de Escala	91
6.2 – Quanto à Utilização da Válvula como Dispositivo de Medição de Vazão	93
6.3 – Com Relação às Válvulas Instaladas nos Açudes do Nordeste	94
6.4 – Conclusões Finais	95
BIBLIOGRAFIA	96
Bibliografia Suplementar	100

Lista de Figuras

	Pág.
Capítulo I	
1.1 – Válvula Dispersora Cônica	12
1.2 – Croquis da Montagem da Válvula no Laboratório	17
1.3 – Corte da Montagem no Laboratório	17
Capítulo II	
2.1 – Válvula Dispersora com Acionamento Manual	27
2.2 – Válvula Dispersora com Acionamento Óleo-Mecânico	27
Capítulo III	
3.1 – Válvula Dispersora Cônica - Caracterização	40
3.2 – Coeficientes E por Hubbard	47
3.3 – Coeficientes Práticos	48
3.4 – $C_f \times \Re$, segundo Rouse	51
Capítulo IV	
4.1 – Distribuição da População no Brasil	53
4.2 – Polígono das Secas	59
Capítulo V	
5.1 – Valores Limites Práticos do Coeficiente de Descarga	66
5.2 – Coeficientes E e ψ para 4 Aletas	70
5.3 – Coeficientes E e ψ para 6 Aletas	71
5.4 – Representação Gráfica dos Patamares	86
5.5 – Curvas de Descarga Propostas para o Açude Mundaú	90
Capítulo VI	
6.1 – Localização dos Coeficientes $E_{\text{Mundaú}}$ e E_{Fec}	92

Lista de Tabelas

Pág.

Capítulo III

3.1 – Erros Prováveis Segundo a Norma I.S.O	31
3.2 – Valores de k para Cálculo de $E = k\psi$, para $\alpha = 45^\circ$	44
3.3 – Coeficientes E por Hubbard	47

Capítulo V

5.1 – Coeficientes Experimentais	65
5.2 – Coeficientes para Válvulas de 4 Aletas	70
5.3 – Coeficientes para Válvulas de 6 Aletas	71
5.4 – Valores de $\Re$ – Modelo EPUSP 1972	73
5.5 – Coeficientes de Summit Control	73
5.6 – Coeficientes de Nottely	74
5.7 – Coeficientes de Fontana	74
5.8 – Vazões Calculadas - Mundaú	77
5.9 – Coeficientes E - Mundaú	78
5.10 – Números de Reynolds - Mundaú	79
5.11 – Vazões Calculadas - FEC	79
5.12 – Coeficientes E - FEC	80
5.13 – Números de Reynolds - FEC	81
5.14 – Coeficientes de Ponte Nova	85
5.15 – Vazões Calculadas	89

Principais Notações e Convenções

Símbolo	Grandeza
a	aceleração, velocidade de propagação de onda de pressão
C_c	coeficiente de contração
C_d	coeficiente de descarga
C_f	coeficiente médio de resistência da placa plana
C_q	coeficiente de vazão
C_v	coeficiente de velocidade
D	diâmetro
ξ	número de Euler
E	coeficiente de vazão teórico que se associa ao número de Euler
g	aceleração da gravidade
h	carga
H	altura manométrica; carga manométrica real
k	fator de conversão entre E e ψ
l	comprimento
p	pressão
$\underline{Q}$	vazão
r	distância radial
R	raio
$\Re$	número de Reynolds
s	deslocamento do cilindro móvel, abertura da válvula
S	área da seção transversal, área do corpo da válvula cônica
s/D	abertura da válvula
V	velocidade média
y	distância
Z	altura
α	semi-ângulo ao vértice do cone fixo da válvula
β	coeficiente angular
ϕ	função, potencial de velocidade
σ	tensão superficial
ε	módulo de elasticidade
μ	viscosidade
π	constante
θ	ângulo
ρ	massa específica
τ	tensão de cisalhamento
ψ	coeficiente prático de vazão das válvulas dispersoras cônicas
ΔH	perda de carga distribuída
Δp	variação de pressões

Resumo:

Apresentação da válvula dispersora cônica, suas características geométricas e seus respectivos coeficientes de vazão.

Otimização da utilização dos coeficientes de vazão, confrontando-os por via teórica e por via experimental, visando melhor esclarecer a questão do efeito de escala.

Apresentação e manipulação dos dados obtidos em laboratório e em campo.

Demonstração de que este dispositivo hidromecânico, além de sua utilidade usual, de controle e de dissipação de energia, pode ser utilizado, com vantagens, como medidor de vazão.

Sugestões para que as válvulas já instaladas nos açudes do nordeste brasileiro, atuando como medidores de vazão, possam contribuir para o aperfeiçoamento da gestão dos recursos hídricos e das pesquisas hidrológicas na região.

Abstract:

Comparisons between theoretical and measured discharge coefficients of “Howell-Bunger” valves were carried out in order to clarify certain questions related to “scale effects”.

It was demonstrated that when discharging freely in open air, this type of valve can be used as an accurate measuring device in addition to its more common use as a simple valve.

Therefore, it is suggested here that the use of the “Howell-Bunger” valves, already installed in most of the dams of dry regions of Brazil, should be extended in order to improve water resources management and hydrological research.

Capítulo I

Generalidades

1.1 - Introdução

Em razão de vantagens oferecidas pelas características mecânicas e hidráulicas, decorrentes de sua simplicidade geométrica, a válvula dispersora cônica é hoje um dos dispositivos hidromecânicos mais utilizados para o controle dos escoamentos e dissipação de energia nas descargas de fundo das barragens. Sendo assim, a regulação das vazões nos estirões de jusante dos cursos d'água represados dependem da precisão das curvas de vazão geralmente fornecidas pelos seus fabricantes.

Por outro lado, com o agravamento da escassez de água, temas que visam evitar o seu desperdício tais como os que versam sobre o reuso das águas servidas, sobre a minimização das perdas nos sistemas de distribuição, além de muitos outros, têm despertado o interesse dos pesquisadores que visam compensar as imposições restritivas ao consumo da água com avanços na área tecnológica.

Temas sobre este assunto, que nas esferas da Engenharia Ambiental e da Engenharia de Recursos Hídricos adquirem aspectos abrangentes, têm suscitado pesquisas mais específicas em outras áreas da engenharia, como é o caso desta dissertação de mestrado, que se volta à precisão de medições de vazões

Assim por exemplo, no nordeste do Brasil, a existência de grande número de represamentos que visam a regularização dos rios tem suscitado certas indagações que só poderão ser convenientemente respondidas com o passar do tempo e a custa de monitoramento e apuração cuidadosa dos dados que vêm sendo coletados. Pensa-se, que a proliferação dos açudes, tendo aumentado a área de evaporação, já pode estar ocasionando uma diminuição do deflúvio.

Dentro deste quadro aparece então a válvula dispersora cônica, equipamento que já está instalado nos açudes mais importantes, cuja correta utilização como medidor não só interessa à Gestão dos Recursos Hídricos da região, como também aos estudos e pesquisas que, daqui para o futuro, deverão contar com medidas mais precisas das vazões defluentes.

Cabe lembrar que a válvula dispersora cônica até hoje não foi encarada como um verdadeiro dispositivo de medição de vazões, apesar de que, como demonstra esta pesquisa, os coeficientes que fundamentam a sua curva de vazão pode ser avaliados com precisão comparável a dos mais precisos aparelhos hidráulicos.

Com a escolha deste assunto para tema desta dissertação, procura-se fornecer algum subsídio aos planos e estudos relacionados à Gestão dos Recursos Hídricos no nordeste e eventualmente aos de outras regiões.

1.2 - Histórico:

A medição de vazão por elementos geradores de depressão, também denominados “deprimogênios”, constituem antigas realizações de física aplicada (que se tem conhecimento). Existem vestígios deste tipo de medição desde os tempos da civilização egípcia (canais de medição para irrigação), e referências em uma obra romana de Frontinus, no ano de 90 de nossa era.

Leonardo da Vinci tratou do assunto num trabalho intitulado “Sobre o movimento da água e as obras fluviais”, no século XV. Não há dúvidas também de que os estudos de Galileu Galilei sobre a hidrostática e os estudos de Torricelli, seu discípulo, sobre o escoamento livre da água através de orifícios, também tiveram considerável importância para o desenvolvimento dos princípios de funcionamento dos elementos geradores de depressão.

As bases da mecânica dos fluidos foram assentadas de forma mais racional e matemática por dois físicos do século XVIII: Bernoulli e Euler. Daniel Bernoulli pertencia a uma família de cientistas suíços, constituída principalmente de mecânicos e matemáticos. Seu tratado de hidrodinâmica, publicado em 1738, formulou então a principal lei dos movimentos dos líquidos, comumente chamada de “Equação de Bernoulli”. Leonard Euler é oriundo também da Suíça e viveu muitos anos em Petersburgo (Leningrado). Estabeleceu, pela primeira vez, as equações diferenciais gerais relativas ao movimento dos líquidos perfeitos.

Em 1732, Henri Pitot apresentou um trabalho destinado à descrição de um aparelho capaz de medir a velocidade da água. Em 1797, Venturi publicou os resultados dos seus trabalhos sobre os princípios do aparelho que costumamos chamar hoje “tubo de Venturi”.

Outras disciplinas também apresentaram desenvolvimentos importantes paralelos aos de hidráulica: o trabalho sobre viscosidade, de Poisseuille e Stokes, no século XIX e os critérios de semelhança hidrodinâmica, de Reynolds, que permitiram formalizar e sistematizar grande material experimental acumulado até então. Reynolds também iniciou o estudo teórico do regime turbulento.

Trabalhos importantes sobre aerodinâmica realizados por Prandtl e Von Karman trouxeram possibilidades de aplicações mais diversificadas de novos medidores de vazão. No fim do século XIX, Clemens Herschel, com base nos estudos de Venturi, desenvolveu o primeiro elemento primário industrial para medir, de forma prática e econômica, grandes volumes de fluidos.

Em 1903, na Pensilvânia iniciou-se industrialmente a história da placa de orifício, quando T. R. Weymouth desenvolveu uma placa com tomadas (“flange taps”), para medir vazão de gás natural. Os resultados deste trabalho foram publicados pela American Gas Association em 1935.

Em 1916, H. Judd divulgou dados sobre medição de vazão com a posição de tomadas em *vena contracta* e sobre placas excêntricas e segmentais. Trabalhos sobre a posição de tomadas a 1 diâmetro antes e $\frac{1}{2}$ diâmetro depois da placa foram desenvolvidos nesta época, para substituir a posição *vena contracta* nas instalações onde mudanças freqüentes de orifício eram necessárias.

A determinação da “curva de vazão” das válvulas dispersoras cônicas ou tipo Howell-Bunger, foi objeto de ensaios experimentais de campo e em laboratório em diversos países, incluindo o Brasil, e foram publicados, quase todos, nas décadas dos anos 60 e 70.

Poucos trabalhos disponíveis trataram de aspectos teóricos e apenas dois tratam da questão do efeito de escala.

Examinando-se hoje este conjunto de dados publicados, constata-se, no caso dos protótipos, que os coeficientes de vazão que fundamentam estas curvas, para idênticas aberturas das válvulas, variam dentro de um amplo intervalo, fato esse que desqualifica a válvula como um medidor de vazão.

Não houve, naquela época, maior interesse em se estender as pesquisas visando esclarecer melhor a questão do coeficiente de vazão para estes equipamentos hidrodinâmicos. Uma explicação para tal fato é que, em geral, para todos os tipos de válvulas, a faixa de incerteza do coeficiente de vazão é bem ampla. Em outras palavras, nunca se pretendeu utilizar esta válvula como um verdadeiro dispositivo de medição de vazão.

Os trabalhos mais recentes que visam a determinação de dados para os projetistas das barragens, focalizaram principalmente os aspectos relacionados à geometria do jato defluente. São trabalhos de laboratório mais preocupados com os aspectos práticos do dimensionamento das obras civis situadas a jusante que do ponto de vista teórico.

Quanto aos aspectos teóricos, quase todos apenas citam a semelhança de Froude, como o de Angelaccio, Fattor, Bacchiega e Barrionuevo.

Excepcionalmente, no trabalho que relatou os ensaios das válvulas da Barragem Summit Control da Eletropaulo, também baseado no número de Froude, houve o cuidado de se comparar as curvas de vazão obtidas no laboratório com as curvas realizadas da projetista da obra civil.

1.3 - Importância:

Temos, nos dias de hoje, uma vasta gama de dispositivos de medição de vazão hidráulica, utilizados tanto industrialmente quanto cientificamente, mas barramos em um binômio que geralmente determina a escolha de determinado dispositivo: o custo-benefício.

Dos diversos tipos de aparelhos destinados à medição de vazões, a escolha de um deles para ser utilizado num sistema hidráulico é tarefa que requer conhecimentos dos fenômenos físicos por ele provocados, além de outros aspectos que o caracterizam. Assim, caso por caso deve ser analisado e confrontado com sistemas semelhantes para que a escolha recaia no aparelho mais adequado.

Nas instalações de grande porte, como é o caso dos órgãos hidráulicos das barragens, normalmente não se instalam medidores de vazões e a avaliação das descargas é feita em função de leituras de réguas linimétricas ou manômetros, que depois são levados às curvas de descarga dos vertedores, das comportas, das válvulas ou aos diagramas de colinas das máquinas hidráulicas, que podem indicar então, um valor para a vazão em escoamento.

O erro da vazão assim avaliada pode ser geralmente determinado, pois essas curvas e diagramas são fornecidos pelos fabricantes apenas para servirem como subsídio ao dimensionamento das obras civis.

No caso de pretender-se conhecer o erro dessas avaliações, pode-se aferir tais dispositivos (em certos casos), por meio de medições diretas de vazões, lançando mão de processos e instrumentos tais como especificados pela norma ISO, por exemplo.

Pode-se obter aparelhos de fácil utilização, alto custo e nem sempre confiáveis a nível de precisão, como por exemplo, os medidores de vazão por ultrassom. Têm-se também os anéis flangeados que se utilizam de piezômetros para determinar vazões, que não têm custo muito alto, mas conservam restrições quanto à sua utilização, e caixas volumétricas, de custo médio, alta precisão, mas que ocupam um espaço nem sempre disponível, a não ser nos laboratórios de hidráulica.

Em um estudo em modelo de uma válvula pode-se e deve-se identificar vários problemas hidráulicos, além dos mecânicos. Enquadramo-nos na questão dos aspectos quantitativos, ou seja, a da determinação da curva característica de vazão. Entende-se por curva característica de vazão como sendo a representação gráfica da lei segundo a qual o coeficiente de vazão varia em função da abertura da válvula.

1.4 - Justificativas:

A válvula dispersora cônica é muito utilizada hoje como dispositivo de dissipação de energia, sendo muito empregada em descargas de fundo de barragens utilizadas para os mais diversos fins.

Válvula Dispersora Cônica (corte longitudinal)

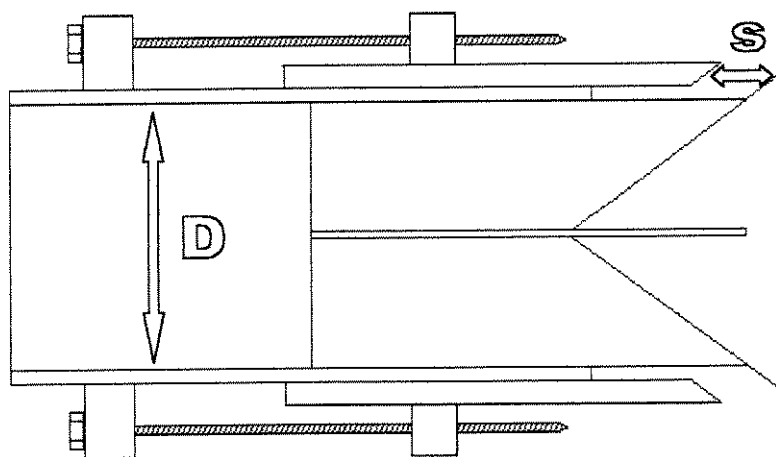


Figura 1.1
Válvula Dispersora Cônica

A intenção é oferecer uma nova opção aos projetistas, combinando baixos custos e boa precisão para a medição de vazões. As válvulas dispersoras cônicas têm como vantagens:

- A válvula, sendo instalada na extremidade de jusante de determinada tubulação é considerada mais adequada que as demais, pois evita a cavitação.

- A válvula suporta grandes alturas manométricas, o que não ocorre com todos os medidores.
- No caso das instalações a céu aberto, tem-se a visualização do fenômeno de dispersão, o que pode dinamizar o processo de detecção de falhas no sistema.
- Facilidade de manutenção e limpeza.

Além destas vantagens que este dispositivo apresenta quando utilizado para a finalidade usual de controle e de dissipação de energia, pode-se apontar as seguintes vantagens que o distinguem das demais válvulas quando se pretende utilizá-lo como medidor de vazões.

1. A área da abertura da válvula, definida geometricamente como área lateral de um tronco de cone, pode ser expressa analiticamente em função da posição do cilindro móvel, não havendo portanto erro matemático na definição desta área.
2. Quando se considera o escoamento bidimensional, os contornos que o dirigem a montante da abertura constituem segmentos de retas facilitando assim o seu mapeamento quando este é considerado como a potencial de velocidades.
3. No caso das menores aberturas da válvula, antes de aproximar-se da saída, o escoamento parte de velocidades bem reduzidas.
4. escoamento, quando considerado tridimensional, é axi-simétrico. Estes fatos (1, 2, 3 e 4) permitem uma avaliação teórica do coeficiente de vazão a partir de cálculos fundamentados na teoria dos escoamentos a potencial de velocidades. O erro do coeficiente, assim determinado, teoricamente é zero.
5. Não existe erro que poderia ser originado do fenômeno de cavitação.
6. No caso de estudos em modelo reduzido, a simplicidade da forma geométrica da válvula permite minimizar o erro da escala geométrica, garantindo maior precisão nos seus resultados.

No caso do nordeste brasileiro, existe a vantagem inquestionável que é o fato de que na maioria dos açudes já existe a válvula instalada. A sua utilização como medidor de vazão não acarretaria nenhum ônus além daqueles relacionados à determinação correta da curva de vazão e a instalação de um conta giros nos mecanismos de abertura da válvula.

1.5 - Objetivos:

O principal objetivo deste trabalho foi o de ampliar o conhecimento do “efeito de escala” relativo às válvulas dispersoras cônicas, através da análise de novos dados experimentais. O efeito de escala pode se referir a avaliações qualitativas ou quantitativas do afastamento do valor de uma determinada grandeza avaliada a partir dos resultados do modelo, com relação ao valor desta mesma grandeza avaliada por ensaios no protótipo.

Pode-se verificar que a ampliação do conhecimento do efeito de escala está ligado diretamente à confiabilidade nos valores dos coeficientes a serem utilizados na determinação da curva de vazão.

Para alcançar este objetivo, foram realizados os trabalhos de campo que visaram a aferição da válvula do açude Mundaú no Ceará e em seu modelo (escala geométrica 1:5), cujos resultados comparados com os dados teóricos e experimentais já publicados e referentes a outros ensaios de campo e de laboratório, permitiram identificar as condições ideais para que os coeficientes a serem utilizados na obtenção da curva de vazão tenham seus erros minimizados.

Aspectos a serem avaliados:

1. Revisão das características hidráulicas das válvulas e de suas expressões analíticas.
2. Revisão dos aspectos teóricos inerentes ao escoamento através das válvula cônica.
3. Avaliação quantitativa da variação do coeficiente de vazão em relação a diversos números de Reynolds.
4. Determinação de “ C_q ou ψ ” e “ E ” (coeficientes de vazão) em laboratório, relacionando-os com números de Reynolds.
5. Avaliação da influência do ar no coeficiente de vazão.
6. Comparação dos resultados obtidos em laboratório e no campo.

1.6 - Metodologia dos ensaios laboratoriais:

A válvula dispersora cônica protótipo ensaiada, localizada no Açude Mundaú (CE) é fabricada pela Sermec S.A., tem descarga ao ar livre (sem câmara), é disposta horizontalmente com 6 aletas (ou asas), tem diâmetro interno de 500 mm, abertura máxima de 250 mm e tempo de abertura ou fechamento de 65 segundos (manobras realizadas por motor elétrico). A válvula é servida por uma tubulação de ferro fundido de diâmetro 750 mm e com um comprimento de 198,55 m entre a tomada d'água e a válvula. Através do nivelamento de leitura de cotas realizadas no dia da coleta de dados, obteve-se uma carga $h = 24,244$ m de coluna d'água.

A primeira etapa realizada foi a construção de uma seção transversal, localizada a aproximadamente 1000 metros a jusante da barragem, com a intenção de se medir a vazão e, assim, se obteve dados para se calibrar a válvula. Tais dados foram obtidos por intermédio de molinete eletromagnético ou sensor de fluxo (flow sensor), fabricado pela OTT Hydrometrie, modelo Nautilus C 2000, com capacidade de medição de 0,000 a 2,500 m/s, com leitura direta de velocidade. Para o cálculo das vazões foi utilizado o Método das Sub-Áreas.

Também foram executados ensaios e testes em laboratório da Faculdade de Engenharia Civil na Universidade Estadual de Campinas, com uma válvula de diâmetro 0,1 m, modelo da válvula do açude Mundaú, de diâmetro 0,5 m, conduzindo a uma escala geométrica de 1:5. É bom citar que a escala geométrica não fornece por si só semelhanças no escoamento do fluido, nos servindo apenas como referência da ordem de grandeza das válvulas em questão. Um dos objetivos foi obter resultados para a comparação de dados das duas válvulas e assim, obter uma curva prática para o coeficiente de vazão ψ para ser utilizada em válvulas semelhantes. A vazão foi obtida por um anel diafragma piezométrico aferido e controlado por duas válvulas normais (ou registros). Os croquis da montagem no laboratório podem ser visualizados nas Figuras 1.2 e 1.3.

As peças e materiais utilizados na montagem da válvula instalada no laboratório da Fec–Unicamp são: 2 m de tubos de ferro fundido de 4", 15 m de tubos de ferro fundido de 6", 6 "L's" de ferro fundido de 6", 1 redução de 6" para 4", 1 válvula dispersora cônica de 4", mantas plásticas para direcionamento de jato, 1 régua piezométrica, 2 registros de 6", 3 cavaletes com calços, 1 anel diafragma aferido, tubulação para restituição, motobomba.

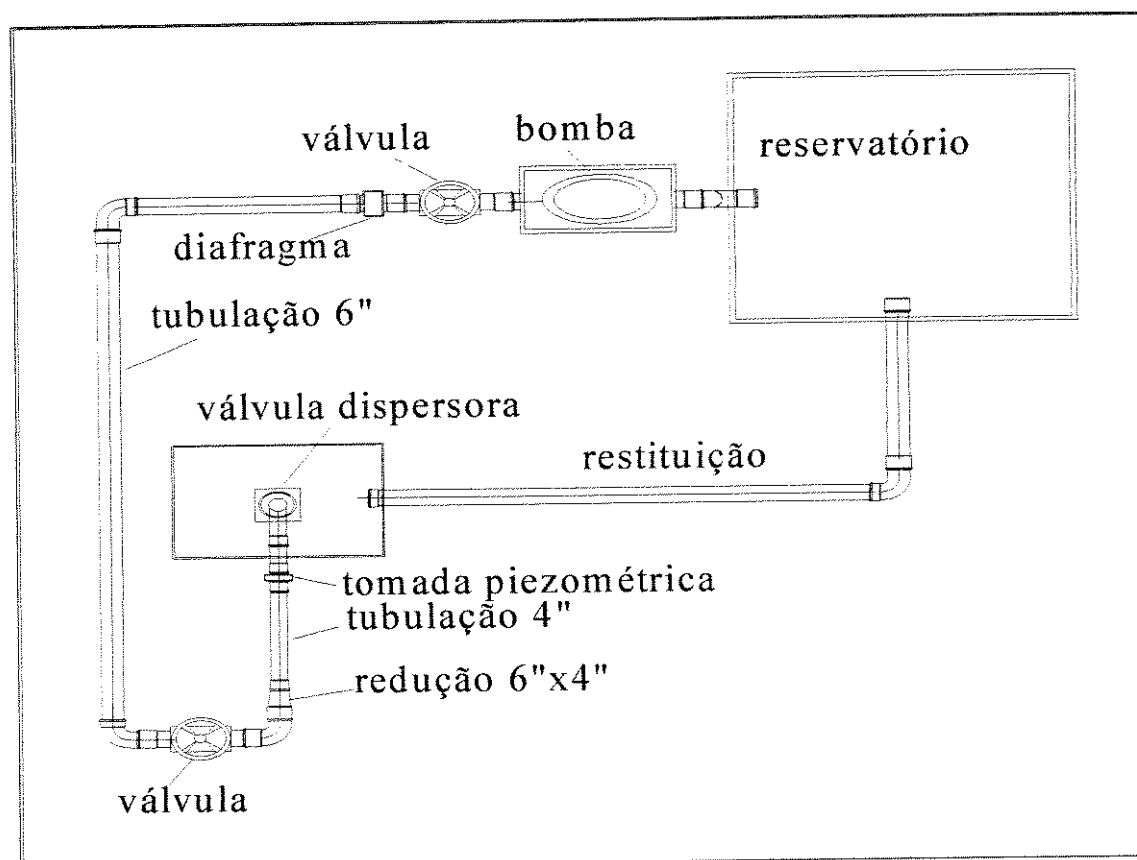


Figura 1.2 - Croquis da Montagem da Válvula no Laboratório

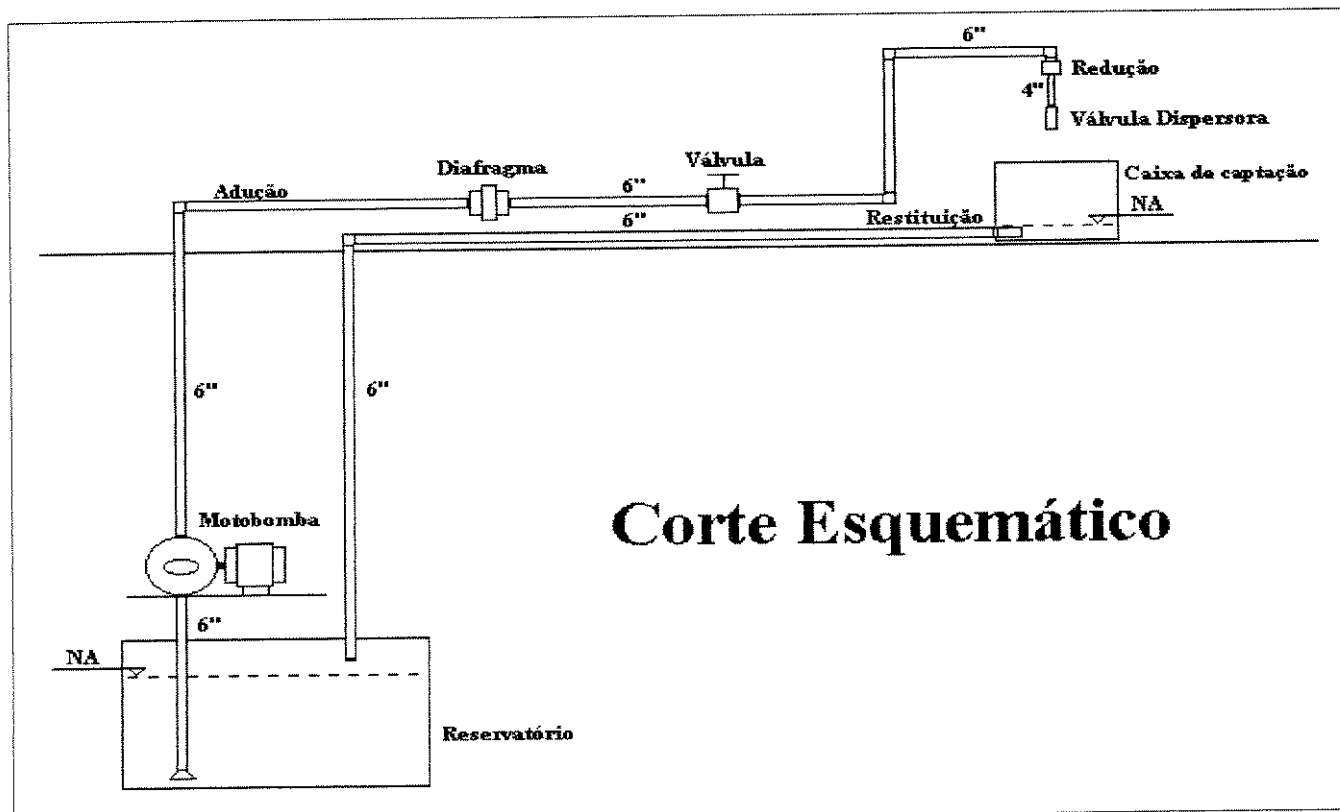


Figura 1.3 – Corte da Montagem no Laboratório

1.7 - Ordenação do Trabalho

Nos capítulos 1 e 2 encontram-se as principais razões que motivaram este estudo, uma resenha da evolução dos trabalhos que visaram a determinação do coeficiente de vazão da válvula dispersora cônica e o objetivo dos estudos aqui relatados.

No capítulo 3, visando facilitar a leitura do trabalho, resumem-se as definições, os conceitos teóricos e as fórmulas geométricas relativas à válvula. Estes encontram-se muito esparsos na literatura técnica.

No capítulo 4 é demonstrado um resumo do que vem sendo realizado em relação ao gerenciamento dos Recursos Hídricos no Brasil, assim como uma síntese de um problema de cálculo de vazão muito comum no nordeste que foi a nós apresentado.

No capítulo 5 expõe-se o desenvolvimento do trabalho, novos conceitos propostos, apresentação dos dados coletados na válvula modelo ensaiada no laboratório da FEC – UNICAMP e a solução apresentada para a determinação da curva de vazões para a válvula dispersora do Açude Mundaú.

No capítulo 6 conclui-se os avanços relatados em todo o trabalho e é demonstrada uma proposta que tem o objetivo de elucidar a utilização dos coeficientes de vazão da válvula dispersora cônica.

Na Bibliografia, são citadas as principais referências utilizadas, assim como uma lista de “sites”(endereços) pesquisados na world wide web (Internet).

Capítulo II

Considerações Gerais

2.1 - A Medição das Vazões - Métodos e Aparelhos Utilizados

A seguir são apresentados alguns dos vários métodos e aparelhos utilizados para a medição de vazões. Com isso, espera-se demonstrar algumas diferenças entre estes e a utilização das válvulas dispersoras como medidor de vazão.

2.1.1 - Medidor de vazão ultrasônico

Este aparelho é o que há de mais recente no mercado na área de medição de vazões. São aparelhos de pequenas dimensões e peso, o que os tornam fáceis de serem transportados. Contam com tecnologia de última geração, não só pelo processo ultrasônico com que conseguem fazer a medição do fluxo de fluidos em tubos, mas também pela sua capacidade de coletar, armazenar, comparar e imprimir dados. Os medidores ultrasônicos conseguem medir vazões de tubos com diâmetros que variam desde 25 mm até 5000 mm aproximadamente, o que atende praticamente a toda a faixa comercial de utilização e têm funções adicionais como velocidade de fluxo, taxa de fluxo, fluxo integrado e direção do fluxo que são apresentadas numa tela de cristal líquido. A unidade central é ligada por meio de cabos a transdutores que se acoplam aos tubos e assim realizam as leituras. Sua precisão se maximiza quanto menor for a velocidade do fluido e maior for o diâmetro nominal do tubo, variando sua acuracidade de $\pm 0.5 \%$ até $\pm 1.5 \%$ aproximadamente. Podem ser utilizados com tubos de aço carbono, aço inoxidável, ferro fundido, PVC, FRP, acrílico, etc.

Os medidores de vazão ultrasônicos têm como desvantagens seu preço elevado e a impossibilidade de utilização em canais abertos ou similares, sendo suas aplicações restritas à utilização em tubos.

2.1.2 - Vertedores

Os vertedores são muito utilizados como medidores de vazão em canais pela sua facilidade de operação e visualização. O vertedor é uma obstrução que faz com que o fluido se acumule e escoe sobre a mesma. Determina-se a vazão medindo-se a altura da superfície de água a montante. Os vertedores construídos a partir de lâminas, chapas ou outras estruturas de tal modo que o jato ou jorro passe livremente ao deixar a face de montante, são chamados vertedores de soleira delgada. Outros vertedores, tais como os vertedores de soleira espessa, são pouco utilizados como medidores de vazão.

O vertedor retangular de soleira delgada tem uma aresta horizontal e o jato contrai-se em cima e em baixo. Assim, pode-se deduzir uma equação para a vazão. Na seção contraída o jato tem linhas de corrente paralelas com pressão atmosférica em todos os pontos. Quando o vertedor não ocupa toda a largura do canal, surgem as contrações laterais. Uma correção empírica para a redução da vazão é conseguida subtraindo-se 10% da altura na largura para cada contração. Diz-se que o vertedor tem suas contrações laterais suprimidas. A carga H é medida a uma distância suficiente a montante do vertedor para evitar a contração da superfície. Uma ponta linimétrica montada num recipiente tranquilizador ligado a uma tomada piezométrica, determina a cota da superfície da água a partir da qual a carga é determinada. Quando a altura do vertedor é pequena, pode-se desprezar a carga da velocidade na seção a montante.

No vertedor de soleira espessa, o escoamento do jato é tal que a variação de pressão é hidrostática na parte mediana da soleira. A equação de Bernoulli aplicada entre a montante da soleira e sua região mediana pode ser utilizada para determinar a velocidade numa altura que despreza a velocidade de aproximação.

Entre as desvantagens dos vertedores estão as dificuldades de construção e aferição, e a necessidade de espaço disponível para a medição de grandes vazões.

2.1.3 - Rotâmetro

O rotâmetro é um medidor de área variável constituído de um tubo transparente cuja seção aumenta gradualmente e de um “flutuador”, que na realidade é

mais pesado que o fluido, que é deslocado para cima pelo empuxo do escoamento ascendente do líquido. O tubo é graduado de modo a se ler a vazão diretamente.

Entalhes existentes no flutuador o fazem girar de modo a manter-se no centro do tubo. Quanto maior a vazão, maior será o empuxo e tanto mais alta será a posição assumida pelo flutuador.

O rotâmetro é mais apropriado para a medição de pequenas vazões que dispensam uma grande precisão para suas finalidades e conta com a facilidade de leitura direta, sendo por isso muito utilizado em medições com fins comerciais de fluidos de baixo custo.

2.1.4 - Medidores de deslocamento positivo

São utilizados para se obter uma vazão média num certo período de tempo, não sendo possível uma leitura instantânea, sendo também chamados de medidores volumétricos. Tais medidores possuem êmbolos ou partições que são deslocados pelo escoamento de um fluido e um mecanismo contador que registra o número de deslocamentos numa unidade conveniente, tal como galões ou pés cúbicos.

Um dos medidores mais comuns é o medidor de disco, que é utilizado em muitos sistemas domésticos de distribuição de água. O disco oscila numa câmara de modo que um volume conhecido de fluido atravessa o medidor para cada oscilação. Uma haste perpendicular ao disco aciona um sistema de engrenagens que por sua vez aciona um contador. Estes medidores, quando em bom estado, têm uma precisão de $\pm 1\%$. O erro poderá ser muito grande para medidores gastos usados em pequenos escoamentos, tais como os provocados por vazamentos de torneiras.

Um medidor rotativo, no qual as conchas ou pás movem-se em torno de uma abertura anular e deslocam uma quantidade fixa de fluido por rotação é freqüentemente utilizado para medir o escoamento de gás em alta pressão ou óleo em tubulações. A vazão em regime permanente, ou vazão média, pode ser determinada com um cronômetro que serve para registrar o tempo de passagem de um dado volume de fluido.

2.1.5 - Medidor Venturi

O medidor Venturi é utilizado para medir a vazão em tubos. Normalmente é uma peça fundida constituída de uma seção a montante do mesmo diâmetro do tubo, com revestimento de bronze e um anel piezométrico para medir a pressão estática, de uma seção cônica convergente, de uma garganta cilíndrica revestida de bronze contendo um anel piezométrico e de uma seção cônica gradualmente divergente que leva a uma seção cilíndrica com a medida do tubo. Um manômetro diferencial é ligado aos dois anéis piezométricos.

A especificação de um medidor Venturi é feita pelos diâmetros do tubo e da garganta. Para se obter resultados precisos, o medidor Venturi deve ser precedido de tubo reto de pelo menos 10 diâmetros de comprimento. No escoamento do tubo para a garganta, a velocidade aumenta e, em linear correspondência, a pressão diminui. Verifica-se que a vazão de um escoamento incompressível é uma função da leitura do manômetro.

As pressões na seção a montante e na garganta são pressões reais, e as velocidades obtidas a partir da equação de Bernoulli sem o termo das perdas são as velocidades teóricas. Quando as perdas são levadas em conta na equação da energia, as velocidades são as velocidades reais. Primeiramente com a equação de Bernoulli (sem o termo da perda de carga), obtém-se a velocidade teórica na garganta. Multiplicando-a pelo coeficiente de velocidade C_v , obtém-se a velocidade real. A velocidade real multiplicada pela área real da garganta determina a vazão real.

2.1.6 - Bocal

O bocal ISA (Instrument Society of America), originalmente o bocal VDI, não tem nenhuma contração do jato além daquela da abertura do bocal, portanto o coeficiente de contração é unitário. O processo de medição de vazão assemelha-se ao das válvulas dispersoras cônicas no que se diz respeito à obtenção do coeficiente de vazão e também utiliza-se de equações similares às do medidor Venturi, mas com $h=0$ para um tubo horizontal. Quando se utiliza o coeficiente de vazão, é importante que as medidas mostradas sejam seguidas fielmente, principalmente nas aberturas piezométricas para medir a queda de pressão. O bocal deve ser precedido de um tubo reto de pelo menos 10 diâmetros de comprimento. O bocal é mais barato que o medidor Venturi, mas tem a desvantagem de que as perdas globais são muito maiores pela ausência de orientação do jato na saída.

2.1.7 - Orifício num reservatório

Pode-se usar um orifício para medir a vazão de saída de um reservatório ou a vazão através de um tubo. O orifício num tanque poderá estar na parede ou no fundo. É uma abertura, geralmente circular, através da qual o fluido escoar. O bordo pode ser delgado ou arredondado. A área do orifício é a área da abertura. No orifício de bordo delgado, o jato de fluido sofre uma contração de aproximadamente meio diâmetro ao longo de uma pequena distância a jusante da abertura. Aquele fluido que se aproxima ao longo da parede não pode fazer a curva em ângulo reto na abertura, conservando deste modo uma componente radial de velocidade que reduz a área do jato. A seção transversal onde a contração é maior é chamada de veia contraída. As linhas de corrente são paralelas ao longo do jato nesta seção e a pressão é atmosférica.

A carga H no orifício é medida a partir do centro do mesmo até a superfície livre e supõe-se que seja mantida constante. A equação de Bernoulli é aplicada entre pontos na superfície livre e no centro da veia contraída, adotando-se como referência a pressão atmosférica local e o plano horizontal de referência passando pelo ponto do centro da veia contraída, desprezando-se as perdas. Obtém-se a velocidade teórica, a velocidade real e a relação entre a velocidade real e velocidade teórica, chamada de coeficiente de velocidade C_v .

A vazão real do orifício é o produto da velocidade real na veia contraída pela área do jato nesta mesma seção contraída.

2.1.8 - Medidor em cotovelo

O medidor em cotovelo para escoamento de fluido incompressível é um dos dispositivos mais simples para a medição de vazão. Ligam-se tomadas piezométricas no lado interno e no lado externo do cotovelo a um manômetro diferencial. Devido à força centrífuga da curva, a diferença de pressões relaciona-se com a vazão. Um trecho reto de regularização deve preceder o cotovelo, e para resultados precisos, o medidor deve ser aferido no local. Como a maioria das tubulações têm um cotovelo, o mesmo poderá ser utilizado como medidor. Depois da calibração, os resultados obtidos são tão confiáveis quanto os obtidos com um medidor Venturi ou bocal.

2.1.9 - Medidores de turbina

O anemômetro baseia-se no fato de que a variação de quantidade de movimento no escoamento, através de uma série de pás recurvadas, provoca uma força ou conjugado que age nas pás. Se a carcaça externa do anemômetro for parte integrante do conduto no qual esteja escoando ar, o sinal de saída de tal medidor pode ser associada com a vazão em volume, pois neste caso a área de escoamento está identificada.

Os medidores de fluxo do tipo turbina são unidades como a descrita acima. São fabricados a prova de água e colocados em tubulações para medir a vazão de diferentes fluidos sob as mais diversas temperaturas e em ambientes corrosivos. O cubo que sustenta as pás poderá conter um magneto, que com o movimento do rotor cria um campo magnético variável. O campo é detectado por uma espira elétrica instalada no revestimento externo da unidade. A frequência dos pulsos magnéticos indica a vazão em um equipamento de leitura que está interligado por uma simples conexão elétrica. Trata-se de um equipamento de custo relativamente elevado.

2.2 - A Necessidade e a Possibilidade da Utilização de Válvulas como Dispositivos de Medição de Vazões

Devido à disponibilidade de vários dispositivos para se medir a vazão de um certo escoamento, atualmente do ponto de vista técnico é fácil instalar um destes aparelhos num determinado sistema. No entanto, há que considerar também a questão econômica. Em muitos casos, como por exemplo em sistemas de tubulações com válvulas, lança-se mão de dispositivos de alto custo, e às vezes não tão precisos, para se medir vazões, sendo que se poderia obtê-la com uma adaptação e calibragem da própria válvula que já se encontra no sistema, mas com outra função.

Uma válvula dispersora cônica devidamente calibrada e atuando como medidor de vazões pode desonerar projetos hidráulicos que utilizam outras formas ou modelos de medidores para se obter a vazão ou o planejamento do manejo hídrico de uma barragem.

As válvulas podem, além de regularizar um determinado fluxo de fluido, ser utilizadas como medidores de vazão, desde que estejam devidamente calibradas de acordo com as condições em que são utilizadas. Esta calibragem deve atender às condições climáticas e atmosféricas da região, ao tipo, coeficiente de vazão e dimensões da válvula.

Atualmente, são encontradas válvulas dispersoras cônicas em muitas barragens e açudes espalhados por todo território nacional, sendo estas utilizadas geralmente como dissipadores de energia e para controle do fluxo das descargas de fundo. Como a cada dia mais se torna importante o controle de suas utilizações devido à crescente escassez de água, procura-se novas soluções para as medições de vazões, sendo a válvula dispersora cônica uma excelente opção, principalmente quando esta já se encontra instalada.

A calibragem de uma válvula, caso seja necessária, pode ser feita de maneira relativamente rápida e com pequeno levantamento de recursos financeiros, quando comparado à utilização de outros métodos para medições de vazões.

Este tipo de válvula é, por sua concepção, simples e robusta, aliada à condição de possuir uma grande segurança de funcionamento, pelo fato de se poder ver e ouvir com relativa facilidade as causas de um possível defeito ou falha de operação. A válvula conta também com a facilidade e rapidez nas manobras de abertura e fechamento, não sendo necessária a utilização de pontes rolantes ou outros dispositivos de manobras.

2.3 - Barragens e Descargas de Fundo

A escolha da válvula dispersora cônica para ser utilizada em descargas de fundo de barragens é tida como uma escolha que envolve principalmente o problema de controle de fluxo e de dissipação de energia, não sendo levado em conta a possibilidade de a mesma ser utilizada também para medir vazões. Neste trabalho, são apresentadas as vantagens de se utilizar a válvula dispersora cônica para esta outra finalidade.

As válvulas cônicas têm como conveniente particularidade a capacidade de dissipar energia em sistemas de condutos forçados que lançam o fluido para a atmosfera. As válvulas produzem um jato cônico divergente que rapidamente se desintegra ao contato do ar envolto e se transforma em gotículas. O jato praticamente é autodissipador, o que torna desnecessária a construção de outros tipos de dissipadores de energia.

Nas pequenas válvulas o processamento das manobras é feito por sistema mecânico e manual e, nas grandes por sistema hidráulico e motorização elétrica.

As válvulas dispersoras conseguem suportar altas pressões, assim como pequenas e grandes vazões e são especialmente indicadas para instalações de descargas de fundo de barragens. A sua utilização ou não em grandes ou pequenas barragens envolve uma série de parâmetros, sendo uma boa opção quando se procura uma solução econômica.

Geralmente são utilizadas comportas no início do sistema de tubulações para facilitar a manutenção das válvulas e aumentar a segurança de operação do conjunto hidráulico.

Nas figuras 2.1 e 2.2 são demonstradas duas válvulas com os tipos de mecanismos de abertura e fechamento.

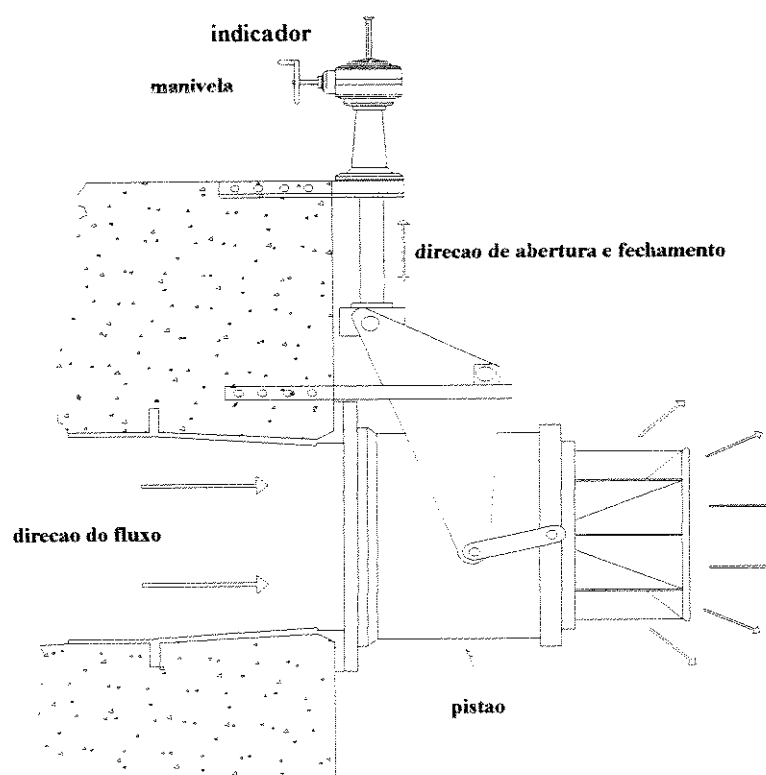


Figura 2.1 – Válvula de Acionamento Manual

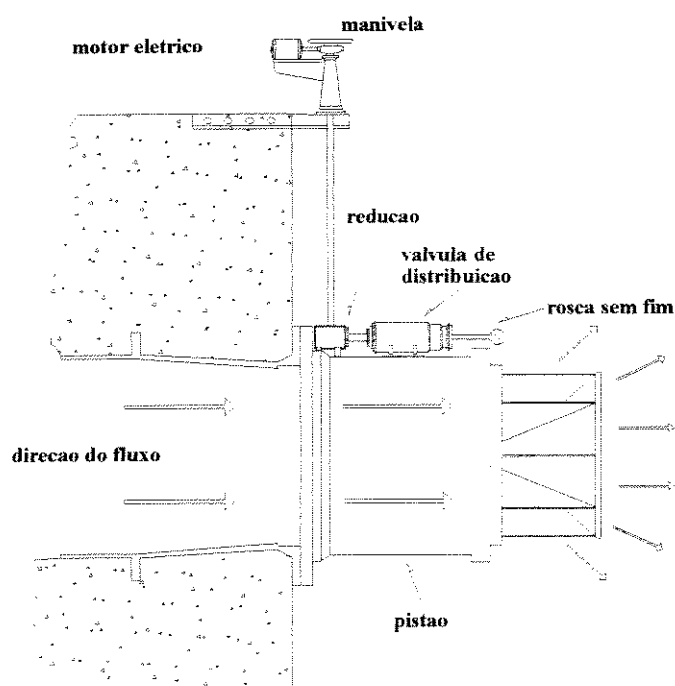


Figura 2.2 – Válvula de Acionamento Óleo-Mecânico

Capítulo III

Utilização de Conceitos Teóricos

3.1 – Associação ao Estudo do Escoamento Através do Orifício Circular

No que se refere ao coeficiente de vazão, a válvula dispersora cônica difere das suas congêneres em razão da sua peculiar forma geométrica. De fato, considerado como bidimensional, o escoamento é dirigido pelos contornos retos na saída da válvula, antes de lançar-se como um jato livre na atmosfera.

Esta condição geométrica, além do fato de poder-se considerar o escoamento como o de um fluido perfeito que acelera-se gradualmente a partir de uma seção onde as velocidades são baixas, constituem as condições que igualmente se encontram no caso do estudo dos orifícios circulares cujo jato é lançado livremente na atmosfera. Assim, a solução matemática com base nas equações do escoamento a potencial de velocidades igualmente se aplica ao caso da válvula dispersora cônica.

Dentro destas hipóteses, sendo o escoamento matematicamente definido, pode-se encontrar analiticamente o coeficiente de contração do jato defluente tal como Kirchoff calculou para o orifício circular, sendo tal cálculo apresentado por Rouse em *Elementary Mechanics of Fluids* em 1946. Hubbard (*Free Streamline Analyses of Transition Flow and Jet Deflection*) posteriormente determinou os coeficientes de contração para a válvula dispersora cônica, considerando diferentes aberturas s/D .

Pode-se notar que os resultados de ensaios em modelos descarregando ao ar livre efetuados nos laboratórios de hidráulica do CTH em São Paulo e Peruca da Iugoslávia, apresentados adiante, muito se aproximam dos resultados teóricos.

Abstraindo-se os erros das medições nos laboratórios, verifica-se que a pequena divergência entre os valores experimentais e o valor teórico do coeficiente de vazão origina-se do efeito das forças de viscosidade e de gravidade. Estes efeitos podem ser então experimentalmente avaliados e equacionados em função dos números de Reynolds, ou eventualmente de Froude, quando for o caso.

Neste trabalho, empregou-se a mesma metodologia utilizada no estudo do coeficiente de vazão dos orifícios circulares.

Assim, considerando-se os coeficientes obtidos analiticamente por Hubbard, reunindo os resultados dos poucos ensaios de campo e de laboratório que foram publicados, e analisando-se os dados que resultaram de ensaios no açude Mundaú e os obtidos no laboratório da Unicamp, conseguiu-se neste trabalho os elementos básicos para o cálculo de uma curva de vazão a ser adotada no caso das válvulas cujos jatos defluem diretamente ao ar livre (condição de descarga das válvulas que se encontram nos açudes do nordeste brasileiro).

3.2 - Teoria dos Erros

É praticamente impossível imaginar alguma forma de coleta de dados que seja por si um básico produto final. Nos mais simples ensaios ou experiências, os dados recolhidos não podem ser considerados, devido a qualquer tipo de erro existente, o que representa fielmente a realidade.

Os três erros básicos em medições físicas podem ser considerados:

- ***Falha do elemento primário que diretamente reflete a quantidade medida.*** Exemplo: A extremidade de uma válvula que por corrosão, desgaste mecânico ou qualquer outro motivo teve seu diâmetro alterado.
- ***Falha do indicador ou elemento secundário que reflete no elemento medidor.*** Exemplo: O instrumento medidor de abertura de uma válvula que esteja com mal funcionamento, seja por desgaste, calibragem incorreta, ou outro motivo.
- ***Falha do observador ou operador para realizar leitura ou manobra corretamente.*** Exemplo: Uma pessoa que conta erroneamente o número de voltas do volante para uma certa abertura de válvula.

Embora os três tipos de erros podem estar presentes numa certa determinação, existe um ou outro que se apresenta como maior fator de problemas. No caso das válvulas cônicas devemos nos preocupar mais com o terceiro tipo, devido à sua robustez.

Estes três tipos de erros produzem duas classes básicas de erros em determinações. São elas:

- ***Precisão*** - Está sempre presente quando medições sucessivas de uma quantidade fixa fornece valores desiguais.
- ***Acuracidade*** - Está sempre presente quando a média numérica de sucessivas medições desviam-se do valor correto e continuam a se desviar não importa quantas leituras forem realizadas.

Isto nos mostra que, apesar de uma válvula estar aparentemente calibrada e aferida para medição de vazões, deve-se realizar aferições e manutenções

preventivas em períodos regulares de tempo e supervisionar e instruir adequadamente os operadores a fim de que se obtenha uma menor probabilidade de erro.

A incerteza quanto aos resultados ou dados coletados estão presentes tanto em ensaios laboratoriais quanto em experiências em campo o que nos fez dar maior ênfase nos cuidados com a seleção de materiais, atenção às medições e escolha dos métodos empregados.

Para a obtenção de um valor do coeficiente de vazão experimental para a válvula dispersora cônica, são necessárias medições que envolvem vazão, nível d'água e pressão, além de outras medições no campo da física.

A norma I.S.O. nos fornece dados que auxiliam a manter um pequeno fator de erro para as medições de vazões, nível d'água e pressão. Tais dados estão registrados na tabela 3.1.

<i>Medição</i>	<i>Processo</i>	<i>Erro Provável</i>
Vazão	Molinetes em canal aberto	± 1,5 %
	Vertedores sem contração lateral	± 1,5 %
	Tubo de Pitot	± 1,5 %
Nível d'água	Pontas em gancho, flutuadores ou ar comprimido	1/h, em %
	Réguas fixas	5/h, em %
Pressão	Manômetros de coluna de mercúrio	0,1/h, em %
	Manômetros de mola (calibrados "in situ")	± 0,5 %

Tabela 3.1
Erros prováveis segundo a Norma I.S.O.

A literatura nos fornece também que o erro provável a ser esperado na determinação do coeficiente de vazão se aproxima ao erro a ser esperado da medição de vazão, ou seja, ± 1,5 %.

3.3 - Número de Reynolds

Define-se um escoamento laminar como sendo aquele no qual o fluido se move em camadas (ou lâminas); uma camada escorregando sobre a adjacente, havendo somente troca de movimento molecular. Qualquer tendência para instabilidade e turbulência é amortecida por forças viscosas de cisalhamento que dificultam o movimento relativo entre camadas adjacentes do fluido. Ao contrário, no escoamento turbulento, as partículas fluidas têm movimento errático com uma grande troca de quantidade de movimento transversal. A natureza de um escoamento, isto é, se laminar ou turbulento e sua posição relativa numa escala de turbulência é indicada pelo número de Reynolds $\Re$, que considera a velocidade média V , o diâmetro D , a massa específica ρ , e a viscosidade μ :

$$\Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad [A]$$

Partindo com escoamento turbulento em um tubo de vidro, Reynolds descobriu que o mesmo tornava-se sempre laminar quando a velocidade era diminuída para que $\Re$ fosse menor que 2000. Este é o menor número de Reynolds crítico para escoamento em tubos e tem grande importância prática. Com as instalações usuais de válvulas cônicas, o escoamento muda de laminar para turbulento no intervalo de 200.000 a 20.000.000 para o número de Reynolds. Neste trabalho, é procurado obter as reações das válvulas dispersoras cônicas neste intervalo.

A natureza de um dado escoamento de um fluido incompressível é caracterizada pelo seu número de Reynolds. Para grandes valores de $\Re$, um ou todos os termos do numerador são grandes quando comparados com o denominador. Isto implica num grande comprimento característico, alta velocidade, elevada massa específica, viscosidade extremamente pequena, ou combinação destes extremos. Os termos do numerador estão relacionados com forças de inércia, ou forças de aceleração ou desaceleração do fluido. O termo do denominador é a causa de forças de atrito viscoso. Assim, o parâmetro número de Reynolds pode também ser considerado como a relação de forças de inércia e viscosas. Um grande $\Re$ indica um escoamento altamente turbulento com perdas proporcionais ao quadrado da velocidade. A turbulência pode ser em pequena escala, composta de um grande número de pequenos vórtices que transformam rapidamente energia mecânica em irreversibilidades por ação viscosa; ou em grande escala, como os vórtices e redemoinhos num rio ou furacões na atmosfera. Os grandes vórtices geram pequenos vórtices, que por sua vez criam a turbulência em pequena escala.

Escoamento turbulento pode ser entendido como um escoamento suave e possivelmente uniforme, superposto a outro escoamento secundário. Em pequena escala, a turbulência tem pequenas flutuações em velocidade que ocorrem com frequência alta. A raiz média quadrática das flutuações e a frequência da variação de sinal das flutuações, são medidas quantitativas da turbulência. Assim, em geral a intensidade da turbulência aumenta com o número de Reynolds.

Para valores intermediários de $\mathcal{R}$, tanto os efeitos viscosos como os de inércia são importantes, e mudanças de viscosidade alteram a distribuição de velocidade e a resistência ao escoamento.

Do mesmo modo como o número de Froude pode indicar até que ponto a força de gravidade influi, o número de Reynolds pode indicar o maior ou menor grau de implicação das forças de viscosidade num escoamento.

As condições práticas sempre fazem com que se reduza o número de Reynolds em se tratando de estudo em modelo. A redução do valor efetivo da carga hidráulica influente pode ser qualquer e pode-se reduzi-la também segundo a mesma escala geométrica, levando à igualdade dos números de Froude, porém os números de Reynolds pertinentes ao modelo e ao protótipo não se igualam.

Desta forma, a relação entre o número de Reynolds e o efeito das forças viscosas impedem então que se adote o coeficiente do modelo como sendo o coeficiente do protótipo.

3.4 - Número de Euler

Em um fenômeno hidráulico, as variáveis que podem intervir, são: um certo número de variáveis geométricas $a, b, c...$; as características cinemáticas e dinâmicas, como a velocidade V e as variações de pressão Δp ; a aceleração da gravidade g ; e as propriedades físicas do fluido, como a massa específica ρ , a viscosidade μ , a tensão superficial σ , e o módulo de elasticidade ε .

A matriz dimensional respectiva será:

	a	b	c	V	ρ	g	Δp	μ	σ	ε
L	1	1	1	1	-3	1	-1	-1	0	-1
M	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
T	0	0	0	-1	0	-2	-2	-1	-2	-2

Sendo a ordem desta matriz igual a 3, podemos tomar para grandezas 3 quaisquer destas grandezas, obedecendo apenas à condição de serem dimensionalmente independentes, isto é, tais que o determinante correspondente seja diferente de zero.

Utilizando-se as grandezas a, V e ρ , cujo determinante dimensional é diferente de zero:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & -3 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{vmatrix} = 1 \neq 0$$

Os parâmetros adicionais serão então:

- Referentes às características geométricas b e c , facilmente se vê que se poderá obter os seguintes parâmetros adicionais:

$$\pi_1 = \frac{b}{a};$$

[B]

$$\pi_2 = \frac{c}{a}$$

[C]

- Referente à variação de pressão, será:

$$\pi_3 = a^x V^y \rho^z \Delta p \quad [\text{D}]$$

ou, dimensionalmente, tendo em atenção que as dimensões de Δp são as de uma força (MLT^{-2}), por unidade de área (L^2).

$$(\pi_3) = L^x (LT^{-1})^y (ML^{-3})^z (MLT^{-2}L^{-2}) \quad [\text{E}]$$

tendo-se então:

$$\left\{ \begin{array}{l} x + y - 3z - 1 = 0 \\ z + 1 = 0 \\ -y - 2 = 0 \end{array} \right\}, \text{ daí: } \begin{array}{l} y = -2 \\ z = -1 \\ x = 0 \end{array}, \text{ ou: } \pi_3 = \xi = \frac{\Delta p}{\rho \cdot v^2} \quad [\text{F}]$$

A este parâmetro sem dimensão é chamado número de Euler ξ , e analogamente podemos conseguir o número de Froude, Reynolds, Weber e outros. Este equacionamento serve para ilustrar o raciocínio para se compreendê-lo e indicar a possível linearização a que pode ser submetido. Mais adiante veremos que o número de Euler é também o próprio coeficiente de contração, ou coeficiente teórico da válvula dispersora cônica.

3.5 - Estudos em Modelos - Semelhança

Freqüentemente são executados estudos em modelos de estruturas hidráulicas, de máquinas hidráulicas e de equipamentos hidromecânicos, com o intuito de fornecer subsídios aos projetistas. Estes estudos permitem uma observação visual do escoamento e obtenção de certos parâmetros ou outras grandezas hidráulicas como por exemplo, coeficientes de válvulas, de vertedores e de comportas, profundidades de escoamentos livres, coeficientes relativos à distribuição de velocidades, empuxos aplicados em determinadas superfícies, de rendimentos, além de muitos outros.

Para se obter dados quantitativos precisos a partir de um estudo em modelo é preciso haver semelhança dinâmica entre modelo e protótipo. Esta semelhança requer que haja uma perfeita semelhança geométrica e que a relação entre as pressões dinâmicas e pontos correspondentes seja constante; existindo a semelhança dinâmica, existe também a semelhança cinemática, isto é, as linhas de corrente devem ser geometricamente semelhantes. A recíproca no entanto não é verdadeira., isto é, a existência da semelhança cinemática não implica na existência da semelhança dinâmica.

A semelhança geométrica, requisito essencial tanto para a semelhança dinâmica quanto para a cinemática, estende-se à rugosidade superficial efetiva do modelo e do protótipo. Se o modelo tem um décimo do tamanho do protótipo em cada uma de suas dimensões lineares, então a altura de suas asperezas deve manter a mesma relação de um para dez. Para que as pressões dinâmicas mantenham a mesma relação em pontos correspondentes do modelo e do protótipo, as relações entre os vários tipos de força devem ser as mesmas em pontos correspondentes. Logo, para haver semelhança dinâmica completa, os números de Mach, Reynolds, Froude e Weber devem assumir os mesmos valores tanto no modelo quanto no protótipo.

No escoamento em condutos forçados em regime permanente, as únicas forças importantes são as viscosas e as de inércia. Logo, observada a semelhança geométrica, a igualdade dos números de Reynolds no modelo e no protótipo conduz à semelhança dinâmica. Os vários coeficientes de pressão correspondentes são os mesmos. Nos ensaios com fluidos de mesma viscosidade cinemática no modelo e no protótipo, o produto VD deve ser o mesmo. Isto requer, geralmente, altíssimas velocidades em pequenos modelos. Vê-se portanto que as condições teóricas acima indicadas, igualdade dos diversos números adimensionais, na prática nunca são conseguidas, pois os únicos fluidos utilizados nos laboratórios são a água e o ar. Assim, por exemplo, no caso de estudos que envolvem escoamentos livres, pode-se adotar a semelhança de Froude. Esta semelhança nos leva a melhores resultados desde que ao escolher-se a escala da semelhança geométrica, se tenha o cuidado de

determiná-la de forma que o número de Reynolds seja superior a um certo valor, de por exemplo 200.000.

As relações entre as velocidades, vazões, pressões e os demais parâmetros hidráulicos são obtidas considerando-se a igualdade dos números de Froude correspondentes ao modelo e ao protótipo.

A semelhança de Froude tem sido a mais utilizada nos estudos que envolveram a válvula dispersora cônica. Ela se presta somente ao estudo das obras civis a jusante. Para o estudo da variação do coeficiente de vazão é necessário executar ensaios que permitam obter dados da função que relaciona o número de Euler ao número de Reynolds.

3.6 - Coeficiente de Vazão da Válvula Dispersora Cônica

3.6.1 – Definição - Caso dos jatos livres

Define-se o coeficiente de vazão Cq , um número adimensional e menor que a unidade, como sendo o produto de outros dois coeficientes menores que a unidade, o coeficiente de contração Cc , e o coeficiente de velocidade Cv .

O coeficiente de contração exprime a relação entre duas áreas e portanto é um número adimensional.

O coeficiente de velocidade exprime a relação entre duas velocidades e portanto é também um número adimensional. Geralmente uma das velocidades é a velocidade teórica:

$$v = \sqrt{2gH} \quad [G]$$

No caso em que jatos de líquidos defluem livremente na atmosfera, partindo de um orifício praticado na parede de um recipiente que contém este mesmo líquido em repouso absoluto, as áreas e as velocidades a que se referem as definições acima podem ser rigorosamente identificadas e medidas.

Assim, uma das áreas a que se refere o coeficiente Cc é a área do orifício da parede do recipiente e a outra área é a da seção contraída onde as velocidades dos filetes que constituem o jato são vetores paralelos e de módulos iguais.

No caso do coeficiente Cv , uma das velocidades é a velocidade teórica, expressa em função da carga hidráulica H e da aceleração da gravidade g , e a outra é a velocidade dos filetes na seção contraída do jato defluente.

Quando as áreas de definição do Cc são as acima definidas, o coeficiente Cc passa a ser o próprio número de Euler ξ .

A utilização do coeficiente de vazão na forma rigorosa de sua definição, isto é, como número de Euler, traz também muitas vantagens práticas, como por exemplo:

- Comparação entre diversas curvas de vazão - De fato, a comparação de curvas de vazão quando se trata de coeficientes práticos é muito prejudicada pelo fato de que todas as curvas tendem a zero, quando a abertura s/D tende a zero.
- Efeito de escala - O tratamento do coeficiente de vazão como um número de Euler permite que se utilizem todos os conceitos teóricos da Mecânica dos Fluidos.
- Identificação de valores limites do ponto de vista teórico - Quando se analisa resultados de ensaios experimentais, por exemplo, valores isolados do coeficiente de vazão podem ser descartados por se afastarem muito do coeficiente teórico.

3.6.2 - Caracterização da Válvula Dispersora Cônica

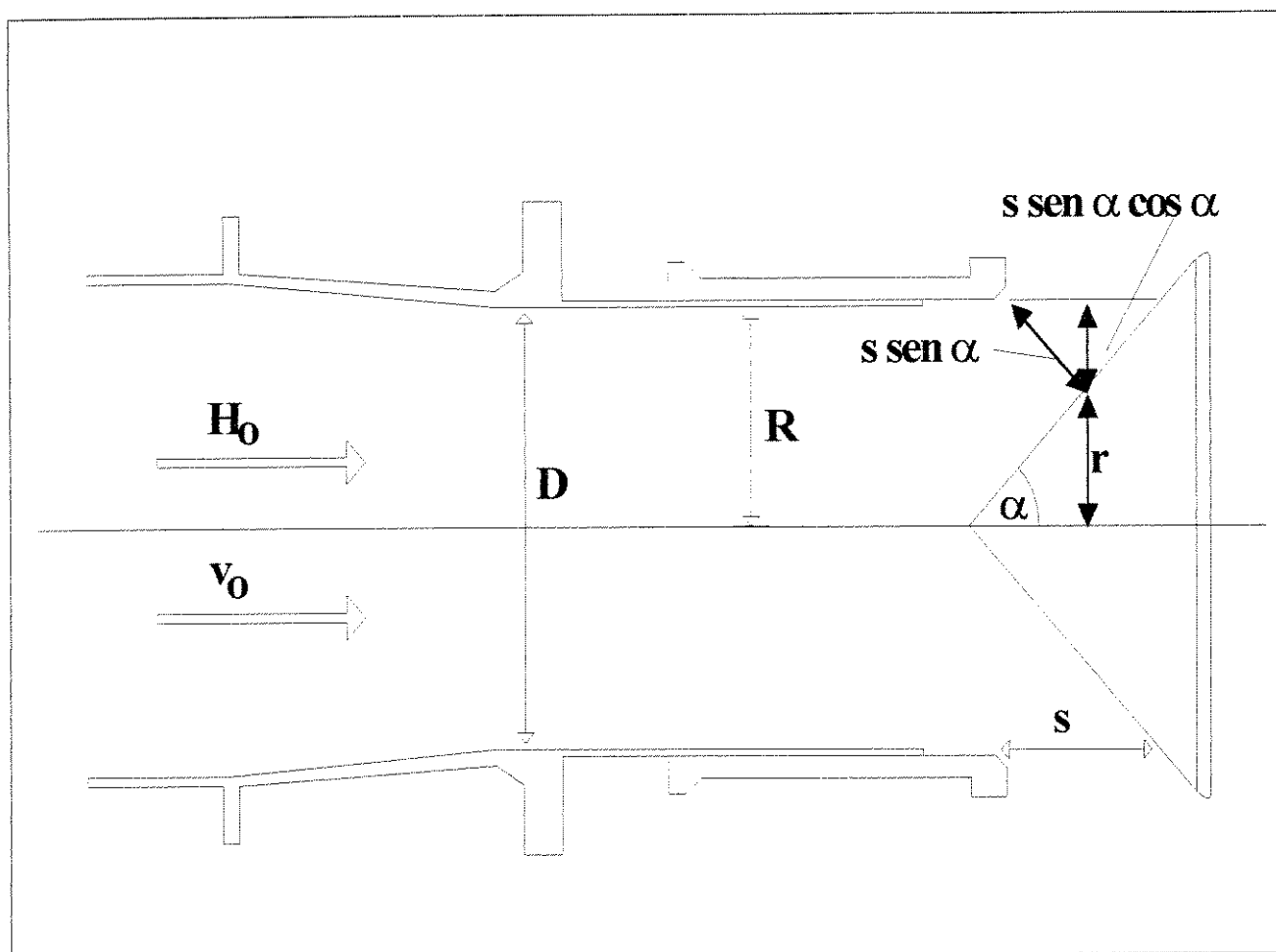


Figura 3.1
Válvula Dispersora Cônica - Caracterização

No que se refere ao coeficiente de vazão, a válvula dispersora cônica se difere das suas congêneres em razão da sua peculiar forma geométrica. De fato, considerado como bidimensional, o escoamento é dirigido pelos contornos retos na saída da válvula, antes de lançar-se como um jato livre na atmosfera.

Esta condição geométrica que igualmente é notada no caso dos orifícios circulares, permite que se considere o escoamento como sendo o de um líquido perfeito e a potencial de velocidades. Nestas condições, sendo o escoamento matematicamente definido, pode-se determinar analiticamente os coeficientes de contração C_c do jato efluente.

Através do cálculo da expressão da área lateral do tronco de cone em função da abertura s , do diâmetro D e do ângulo α , temos então:

$$S = \pi(R + r)L \quad [\text{M}]$$

Pela Figura 3.1, tem-se:

$$R = D/2 \quad [\text{N}]$$

$$r = D/2 - s \cdot \text{sen } \alpha \cdot \cos \alpha \quad [\text{O}]$$

$$L = s \cdot \text{sen } \alpha \quad [\text{P}]$$

Então:

$$S = \pi s \text{sen } \alpha \left(\frac{D}{2} + \frac{D}{2} - s \text{sen } \alpha \cos \alpha \right) \quad [\text{Q}]$$

Logo:

$$S = \pi s \text{sen } \alpha (D - 0,5 s \text{sen } 2\alpha) \quad [\text{R}]$$

3.6.3 - Casos em que é difícil definir-se geometricamente a área do orifício ou passagem da água.

Muitas vezes, sendo difícil ou até mesmo impossível encontrar-se uma definição geométrica para a área da passagem de água, estende-se o conceito de coeficiente de vazão tomando-se arbitrariamente uma área conhecida e invariável como referência. No caso das válvulas toma-se quase sempre a área da tubulação como referência.

Esta dificuldade de definir-se geometricamente as áreas das passagens de água levou até a uma definição arbitrária por parte dos fabricantes americanos de válvulas que evita a identificação física da área.

Para estes fabricantes assim se define este interessante coeficiente de vazão:

O coeficiente de vazão e a vazão de água de densidade igual a 1, expressa em galões americanos, atravessa a passagem de água da válvula ocasionando uma perda de carga de 1 p.s.i.

Nas nossas unidades esta definição seria:

O coeficiente de vazão e a vazão de água expressa em litros por minuto que cria uma perda de carga de 5 mbar, ou seja, 0,05 m de coluna d'água.

Nas unidades americanas:

$$Cq = \frac{Q}{\sqrt{\Delta H}} \quad [S]$$

, onde:

Q = vazão em galões americanos

ΔH = perda de carga em p.s.i.

Nas nossas unidades:

$$Cq = \frac{13,3 \cdot Q}{\sqrt{\Delta H}} \quad [T]$$

, onde:

Q = vazão em litros por segundo

ΔH = perda de carga em metros de coluna d'água

3.6.4 - Coeficiente E

O coeficiente E é definido de forma que possa ser associado ao número de Euler ξ , permitindo uma melhor interpretação dos resultados dos ensaios experimentais:

$$E = \frac{V}{\sqrt{2gH}} = \frac{V}{\sqrt{2 \frac{\Delta p}{\rho}}} \quad [H]$$

Sendo que V , velocidade na seção contraída deve ser obtida a partir da vazão pela expressão:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\pi s \sin \alpha (D - 0,5s \sin 2\alpha)} \quad [\text{I}]$$

Quando s/D tende a zero, E tende a um valor diferente de zero.

3.6.5 - Coeficiente prático ψ

Neste trabalho, o coeficiente prático das válvulas dispersoras cônicas será definido como ψ , embora seja também encontrado na literatura como μ . Na prática, tem-se quase que exclusivamente utilizado o coeficiente ψ , definido em função da área do círculo correspondente ao corpo da válvula, ou seja:

$$\frac{\pi D^2}{4} \quad [\text{J}]$$

A fórmula para obtenção de ψ mais utilizada é:

$$\psi = \frac{Q}{\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2 g H}} \quad [\text{K}]$$

Quando s/D tende a zero, Q tende a zero, e desde que os termos $\pi D^2/4$ e $\sqrt{2 g H}$ permaneçam constantes, ψ deve tender a zero.

A designação coeficiente prático de vazão se refere mais à utilização do que à maneira de como se é obtido, pois seu valor também pode ter origem em cálculos e desenvolvimentos matemáticos baseados em conceitos exclusivamente teóricos.

O coeficiente prático de vazão ψ , à primeira aproximação, depende somente da abertura da válvula que marca uma determinada posição do pistão, pois

pode-se supor que ao variar a carga, a relação entre Q e $\sqrt{H}$ permaneça constante para uma mesma válvula.

Em alguns casos, o coeficiente ψ tem de ser transformado para que possa ser associado ao número de Euler, e assim obter seu valor correspondente como coeficiente de vazão E , através do cálculo da expressão da área lateral do tronco de cone em função da abertura s , do diâmetro D e do ângulo α . O fator de conversão pode ser obtido pela expressão:

$$k = \frac{E}{\psi} = \frac{1}{4 \left[\frac{s}{D} \frac{\sqrt{2}}{2} \left(1 - 0,5 \frac{s}{D} \right) \right]} \quad , \text{ para } \alpha = 45^\circ \quad [\text{L}]$$

Ou, de maneira mais prática, pela tabela 3.2.

<i>s/D</i>	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
<i>k</i>	35,53	17,86	11,97	9,019	7,252	6,075	5,234	4,604	4,113	3,722
<i>s/D</i>	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2
<i>k</i>	3,401	3,134	2,909	2,715	2,548	2,402	2,273	2,158	2,056	1,964
<i>s/D</i>	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
<i>k</i>	1,881	1,806	1,737	1,674	1,616	1,563	1,514	1,468	1,426	1,386
<i>s/D</i>	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4
<i>k</i>	1,350	1,315	1,283	1,253	1,224	1,198	1,172	1,149	1,126	1,105
<i>s/D</i>	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5
<i>k</i>	1,085	1,066	1,047	1,030	1,014	0,998	0,983	0,969	0,956	0,943
<i>s/D</i>	0,51	0,52	0,53	0,54	0,55	0,56	0,57	0,58	0,59	0,6
<i>k</i>	0,931	0,919	0,908	0,897	0,887	0,877	0,868	0,859	0,850	0,842

<i>s/D</i>	0,4598
<i>k</i>	1,000

Tabela 3.2
Valores de k para cálculo de $E = k\psi$, para $\alpha = 45^\circ$

3.7 - Aplicação ao Caso da Válvula Dispersora Cônica

No caso da válvula dispersora cônica, o coeficiente prático fica então definido da seguinte forma:

$$Cq = \frac{Q}{S\sqrt{2gH}} \quad [U]$$

Sendo que S é a área do corpo da válvula cônica. O espaço ocupado pelas aletas é geralmente desprezado na avaliação desta área. Sendo assim, $S = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ tem um valor independente da abertura da válvula s , g é a aceleração da gravidade e H é a carga hidráulica na flange da válvula.

O coeficiente teórico, o número de Euler, é definido pela mesma fórmula [U]. A diferença é que a área S , que tem sua expressão abaixo, é variável, e o seu valor depende da abertura da válvula.

$$S = \pi \cdot s \cdot \sin \alpha \cdot (D - 0,5 \cdot s \cdot \sin 2\alpha) \quad [V]$$

3.8 - O Escoamento a Potencial de Velocidades

Teoricamente, no estudo da cinemática dos fluidos, considera-se que os escoamentos podem ser classificados como rotacionais e irrotacionais.

Nos casos da Engenharia Naval e da Engenharia Aeronáutica por exemplo, a teoria potencial é fundamental quando se trata de estudar o deslocamento de corpos com formas hidrodinâmicas com relação a um fluido.

Os estudos de escoamentos tratados como irrotacionais que têm-se demonstrado mais fecundos no que se refere a resultados práticos para a Engenharia Hidráulica, dizem respeito aos escoamentos através de orifícios, sobre vertedores e em trechos de condutos forçados com singularidades arredondadas.

As características mais comuns a estes casos são:

- O fluido é acelerado bruscamente partindo de uma situação de repouso ou de velocidade bem reduzida, quando então é pequena a tendência à rotação.
- O número de Reynolds é geralmente muito grande fazendo com que a viscosidade pouca influa no escoamento.
- Além da hipótese de irrotacionalidade, há que se considerar que deve-se tratar de fluido perfeito e incompressível, hipótese bem aceitável para o caso da água.

A solução de um problema de determinação dos elementos de um escoamento passa a ser então o de resolver uma equação diferencial, a equação de Laplace. Cada solução representa um específico caso de escoamento a potencial.

A solução para o caso da válvula dispersora cônica publicada por Hubbard, em *Free Streamline of Transition Flow and Jet Deflection*, levou aos valores indicados no Gráfico da Figura 3.2, do qual foram extraídos dados para a construção da Tabela 3.3.

Na Figura 3.2 são apresentados os coeficientes práticos obtidos por Elder e Dougherty (Nottely) e por Gr $\square$ i $\square$ (Peruca) para título de comparação com os dados que obteremos mais adiante.

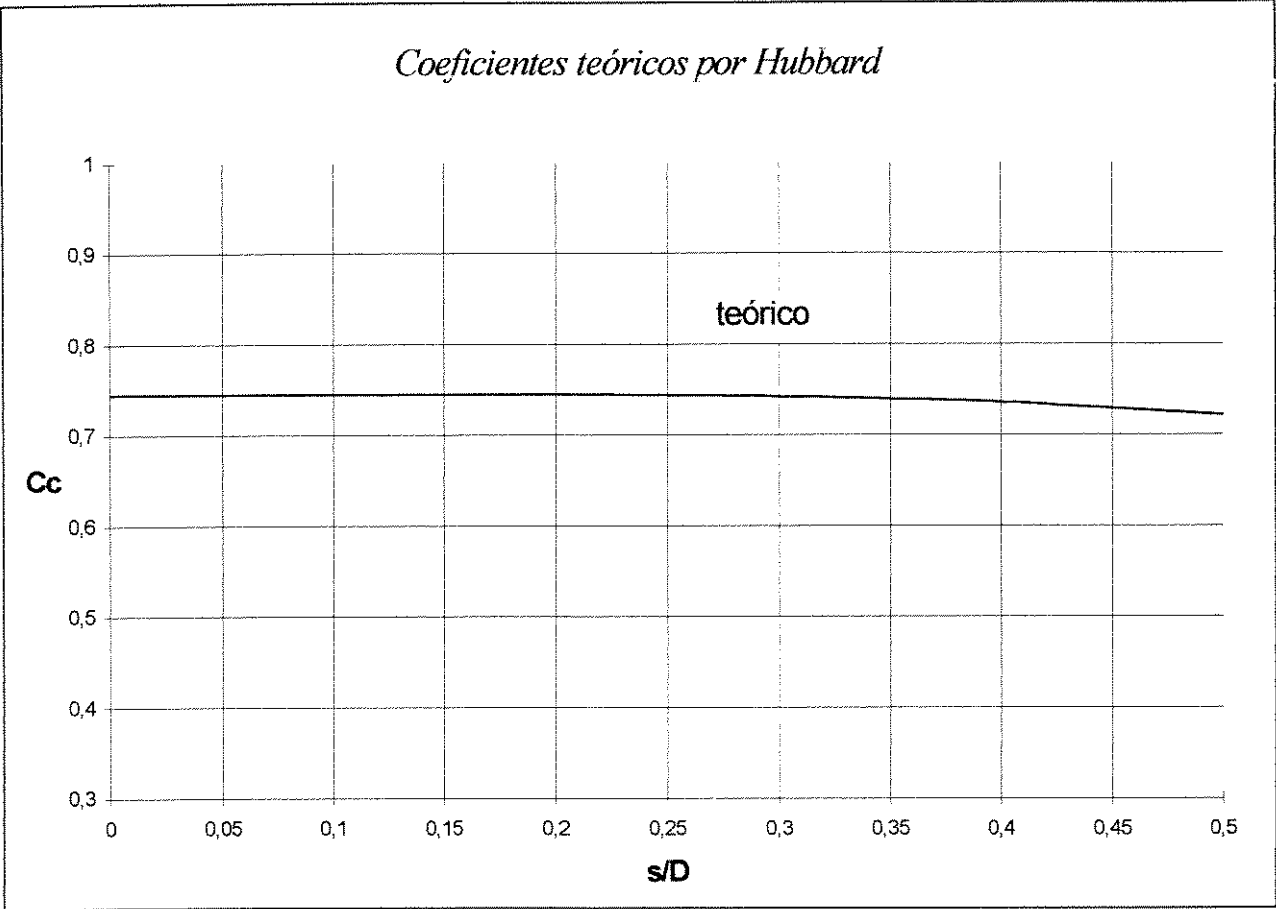


Figura 3.2
Coeficientes *E* por Hubbard

<i>s/D</i>	<i>E</i>
0,05	0,746
0,10	0,746
0,15	0,746
0,20	0,746
0,25	0,746
0,30	0,745
0,35	0,741
0,40	0,736
0,45	0,730
0,50	0,723

Tabela 3.3
Coeficientes *E* por Hubbard

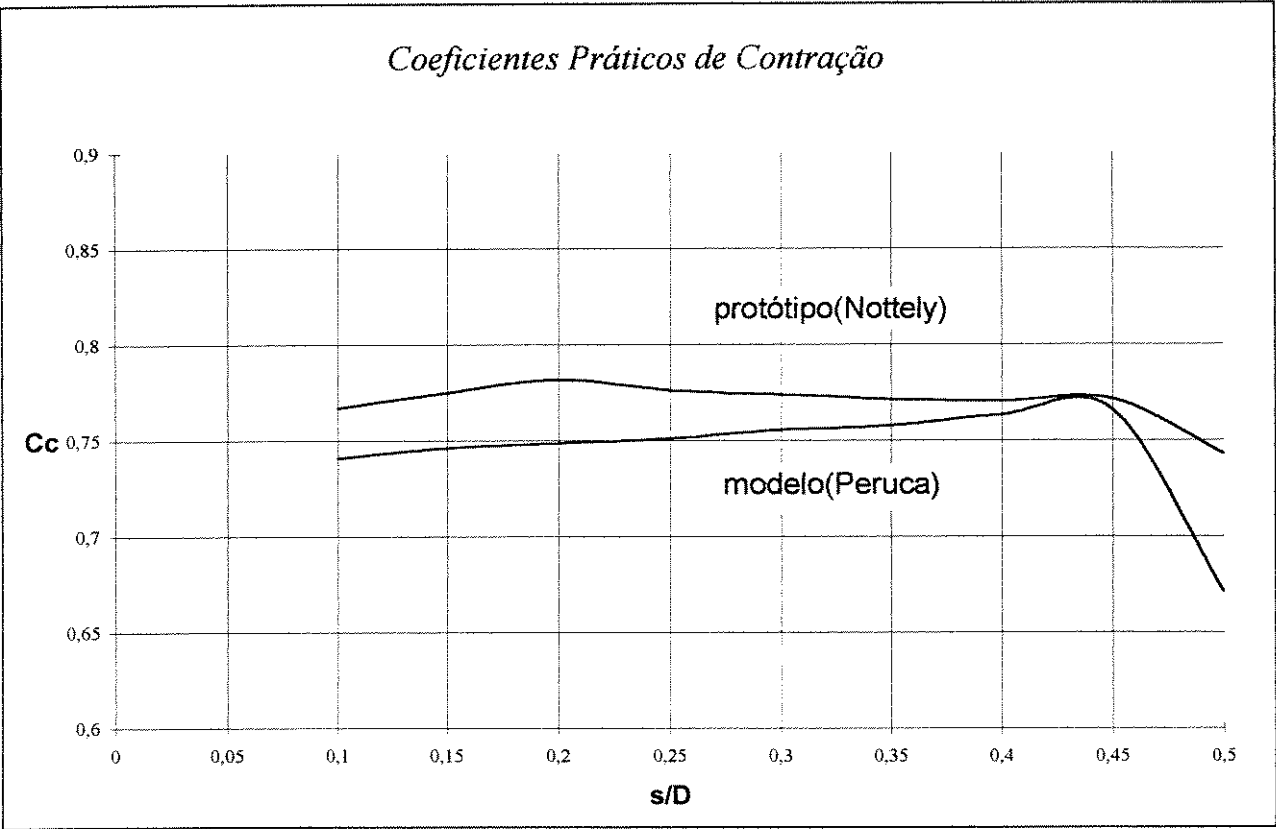


Figura 3.3
Coeficientes Práticos de Nottely e Peruca

É bom frisar que os coeficientes C_c (coeficientes de contração) podem, neste caso, serem reconhecidos como sendo o coeficiente de vazão E . Desta maneira podemos compará-los também aos coeficientes E de Hubbard da Figura 3.2.

3.9 - A Placa Plana - Coeficiente de Resistência em Função do Número de Reynolds.

As aletas da válvula dispersora cônica, constituídas por chapas metálicas soldadas ao cone e ao corpo cilíndrico da válvula, oferecem resistência à passagem do fluxo, de forma que a carga hidráulica no local de defluência do jato, onde o escoamento se faz a potencial de velocidade, é inferior à carga hidráulica na seção da sua flange. Desta forma, o coeficiente de vazão obtido por via experimental deverá ser menor que o coeficiente de contração de acordo com a definição já apresentada:

$$Cq = Cc. Cv \quad [W]$$

Os estudos anteriores provaram que Cv se altera segundo a mesma lei de variação do coeficiente de resistência da placa plana.

Matematicamente, pode-se dizer que Cv é função de função do número de Reynolds, ou seja:

$$Cv = f(Cf) = \varphi(\mathfrak{R}) \quad [X]$$

,onde: Cf = coeficiente médio de resistência da placa plana

A função $Cv = \varphi(\mathfrak{R})$ é uma função transcendente e geralmente, como tal, é apresentada graficamente. Este estudo baseou-se no gráfico proposto por Rouse, apresentado na Figura 3.4.

Neste gráfico pode-se observar que para os menores valores de $\mathfrak{R}$, isto é, quando o regime é laminar, a função que pode então ser deduzida por via inteiramente teórica está representada pela reta:

$$Cf = \frac{1,328}{\sqrt{\mathfrak{R}}} \quad [Y]$$

Os valores experimentais confirmam as deduções teóricas.

Para os valores mais altos do número de Reynolds, isto é, na região que corresponde ao regime turbulento, os valores experimentais de Cf obtidos por muitos pesquisadores estão contidos numa estreita faixa como observa-se no gráfico. Foi

proposta uma expressão analítica, que graficamente é a curva de melhor aderência a todos esses pontos, para representar a função no caso do escoamento turbulento.

Esta expressão, conhecida como fórmula de Karman-Schoenherr tem por expressão:

$$\frac{1}{C_f} = 4,13 \cdot \log_{10}(\Re \cdot C_f) \quad [Z]$$

Na região intermediária que corresponde à transição entre o regime laminar e o turbulento, os valores encontrados pelos pesquisadores variam de forma quase aleatória. Rouse propôs, no seu gráfico, uma curva sinuosa para representar esse regime de transição.

Neste estudo verificou-se que essa curva proposta por Rouse é coerente com a variação do número de Euler, neste intervalo de variação dos números de Reynolds.

No gráfico proposto por Rouse encontram-se pontos experimentais de quatro pesquisadores diversos: Blasius, Gebers, Wieselsberger e Kempf.

Os pontos correspondentes às experiências de Blasius confirmam as deduções teóricas, só possíveis para o regime laminar e que levaram à expressão [Y], e indicam que para valores de Reynolds no entorno de 300.000 inicia-se um patamar correspondente a valores iguais de C_f no entorno de 0,0022. Estes valores são os mínimos que se encontram nesta região do gráfico. Este patamar prolonga-se até valores de Reynolds no entorno de 700.000 onde, daí para diante, os pontos de Blasius indicam um aumento da resistência até um outro patamar correspondente a valores constantes de C_f , próximos de 0,0031.

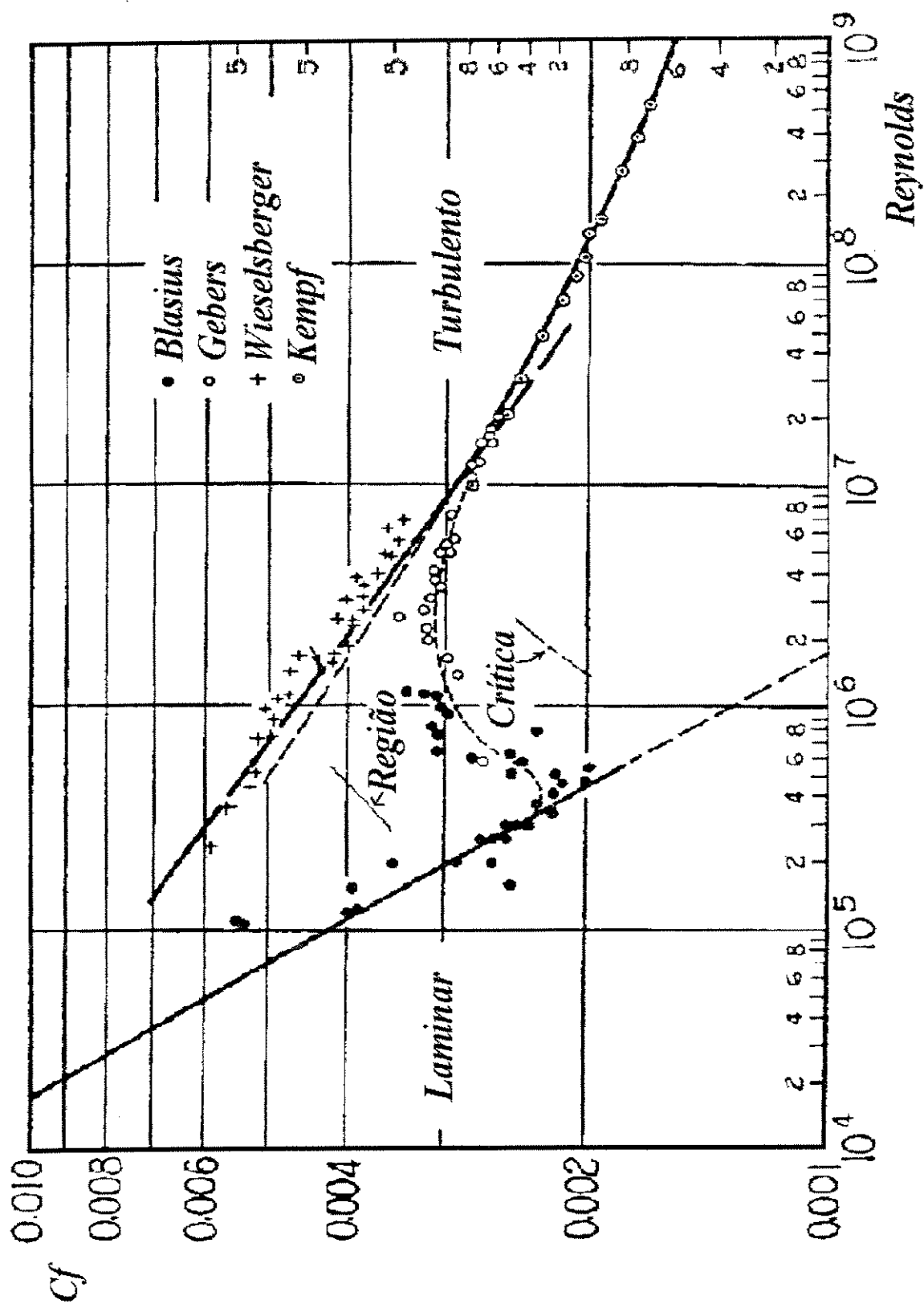


Figura 3.4
 $C_f \times R$, segundo Rouse

Capítulo IV

Gerenciamento e Planejamento de Recursos Hídricos

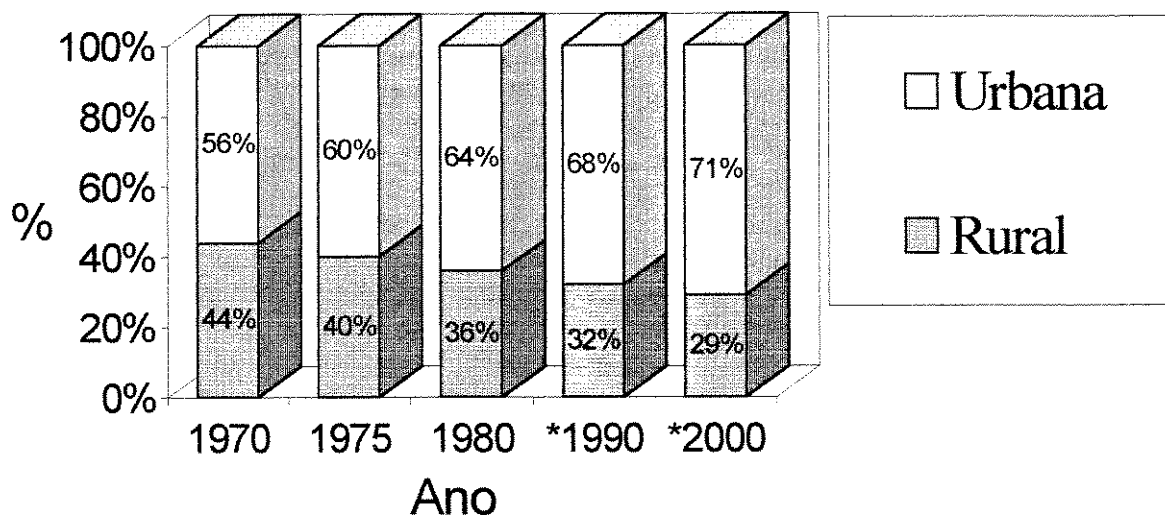
4.1 - A Gestão dos Recursos Hídricos

4.1.1 - Crescimento populacional e demanda hídrica

O primeiro recenseamento populacional para todo território brasileiro data de 1872, quando foi constatada uma população em torno de 10 milhões de habitantes. A evolução e o crescimento populacional absoluto e relativo de 1872 a 1970, quer por unidades, quer por regiões, estão sintetizados e nos fornece muitas conclusões interessantes, sendo uma delas a de que mantendo-se o ritmo atual de crescimento, teremos duplicada nossa população em apenas trinta anos, ou seja, perto de duzentos milhões em torno do ano 2000.

A água, como recurso natural essencial, tem na potabilização e irrigação umas de suas principais finalidades. Considerando-se que o consumo diário atual de água por pessoa, em média, seja de aproximadamente 300 litros e supondo-se um fornecimento de água a cerca de 50% da população brasileira (mais de 61 milhões de pessoas, segundo o IBGE para 1978), chegaremos a uma demanda global superior a $18,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$. Se efetuarmos a mesma estimativa para o ano 2000, aceitando também a previsão do IBGE de que a população brasileira estará em torno de 200 milhões no ano 2000, e considerarmos ainda um consumo aumentado para 500 litros, esta demanda será sensivelmente maior, ou seja, da ordem de $50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{dia}$. Estes números globais são significativamente alterados para mais se levarmos em conta o fato de que a partir da década de 60, a população urbana sobrepujou a população rural (figura 4.1), e que a concentração nas áreas metropolitanas se torna cada vez maior. Conseqüentemente, a pressão da demanda sobre as redes de abastecimento público de água deverá estar em franco crescimento. Além deste fato, deve-se considerar o uso industrial, também cada vez maior, bem como o uso para irrigação.

Distribuição Populacional no Brasil



* Estimativa

Fonte: FIBGE

Figura 4.1
Distribuição Populacional no Brasil

4.1.2 - O planejamento do balanço hídrico do Brasil

Até a pouco tempo, o balanço hídrico vinha sendo tratado como um problema puramente de Geofísica. Por outro lado, é indubitável que a água é essencial a várias atividades humanas e seu uso, por depender de obras de grande período de manutenção e alto custo, exige um planejamento cuidadoso envolvendo largos horizontes temporais. Sob esta visão, o balanço hídrico fornece informações importantes ao processo de planejamento, pois serve para caracterizar a disponibilidade hídrica.

O confronto das disponibilidades com as demandas hídricas levantadas a partir das características da área em estudo, é que irá determinar espacial e temporalmente a necessidade de adoção de medidas estruturais e não estruturais destinadas a corrigir eventuais desequilíbrios.

Os propósitos geralmente presentes em um esforço de planejamento de recursos hídricos podem ser categorizados em:

- Exploração dos benefícios oriundos do uso da água encanada como recurso natural.
- Minimização dos efeitos nocivos (e às vezes catastróficos) causados pela mesma água.

Entre os aspectos benéficos convém ressaltar, entre outros, o abastecimento urbano, o controle da poluição hídrica e a geração energética, bem como a dotação de água suplementar de irrigação destinada a suportar agricultura intensiva. A água também pode criar sérios problemas para as atividades humanas. Entre estes, situam-se as secas e as cheias, causadas na maioria dos casos por motivos naturais, e a poluição hídrica, geralmente provocada por atividades humanas.

A geração energética não causa, em geral, alterações substanciais na quantidade e na qualidade do recurso hídrico utilizado. Exceções a esta afirmativa são constituídas por grandes reservatórios de regularização que se destinam a manter vazões aproximadamente constantes para engolimento em usinas hidroelétricas ou simplesmente para aproveitamento da água (açudes), se localizados em zonas de alta evaporação. Tais reservatórios originam perdas que podem atingir níveis consideráveis. A produção de alimentos é um processo que depende da umidade disponível no solo.

Caso o balanço hídrico natural não seja suficiente para manter níveis de umidade adequados, será necessária a adição de água suplementar de irrigação. O consumo de água para fins agrícolas é também considerado elevado.

4.1.3 - Política de recursos hídricos

Atualmente, existe uma grande preocupação com a utilização dos bens naturais renováveis ou não renováveis. Percebe-se, que com o passar dos anos, a água, um bem até a algum tempo considerado inesgotável, começa a se tornar escassa em regiões que sempre a tiveram com fartura, principalmente naquelas próximas a grandes centros industriais e residenciais, regiões agrárias que se utilizam muito da irrigação e outras que por qualquer motivo se obrigaram a ter um consumo mais elevado de água doce. A água nos dias de hoje é tida como um bem público, não tendo

restrições à sua utilização, sendo que para se instalar uma indústria deve-se apenas conseguir uma autorização do Estado ou da União. No caso de irrigadores também é necessária tal autorização, se bem que os agricultores não se preocupam tanto com isso. Hoje existe uma grande preocupação em relação à utilização da água porque não é um bem inacabável.

Os órgãos ambientalistas e governamentais começam a desviar suas atenções para um problema que a cada dia se torna mais enfático: o consumo indiscriminado de água. Atualmente é desenvolvido no Brasil (mais intensamente no Estado de São Paulo), alguns estudos de gerenciamento e planejamento de recursos hídricos com o objetivo de se regularizar o consumo. Tais planos abrangem o enfoque sistêmico em recursos hídricos (dimensões da complexidade, escala dos problemas, grande interconexão dos componentes, relações físicas, biológicas e químicas, inserção social, institucional e legal, aspectos ambientais, etc.) e um procedimento padrão para o planejamento (definição de objetivos, tradução dos objetivos em critérios de projeto, geração de alternativas, avaliação das alternativas segundo critérios, etc.).

É apresentado a seguir um resumo do que vem sendo realizado no Estado de São Paulo para se sistematizar uma política de recursos hídricos:

Objetivos e princípios da política: divisão hidrográfica (gestão), implantação de mecanismos (plano, sistema, fundo), sistema de gestão (CRH, comitês de bacias, agências de bacias).

A criação da Lei 9034 de 27/12/94 estipula cobrança pelo uso da água, outorga cadastro de irrigantes e verifica disponibilidade hídrica para irrigação.

Foi demonstrado como um dos problemas da política adotada o problema de bombeamento do Rio Pinheiros, poluindo a Represa Billings que, como outros, é de difícil resolução.

- Bases:

- Constituição Estadual de 1989

- > Lei 7663 de 30/12/91

Estabelece normas de orientação à Política Estadual de Recursos Hídricos e ao Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

- Objetivos:

- Aplicação do princípio de desenvolvimento sustentável com relação aos recursos hídricos, o mais ameaçado pela poluição e exaustão.

- Assegurar que a água possa ser controlada e utilizada em condições satisfatórias.

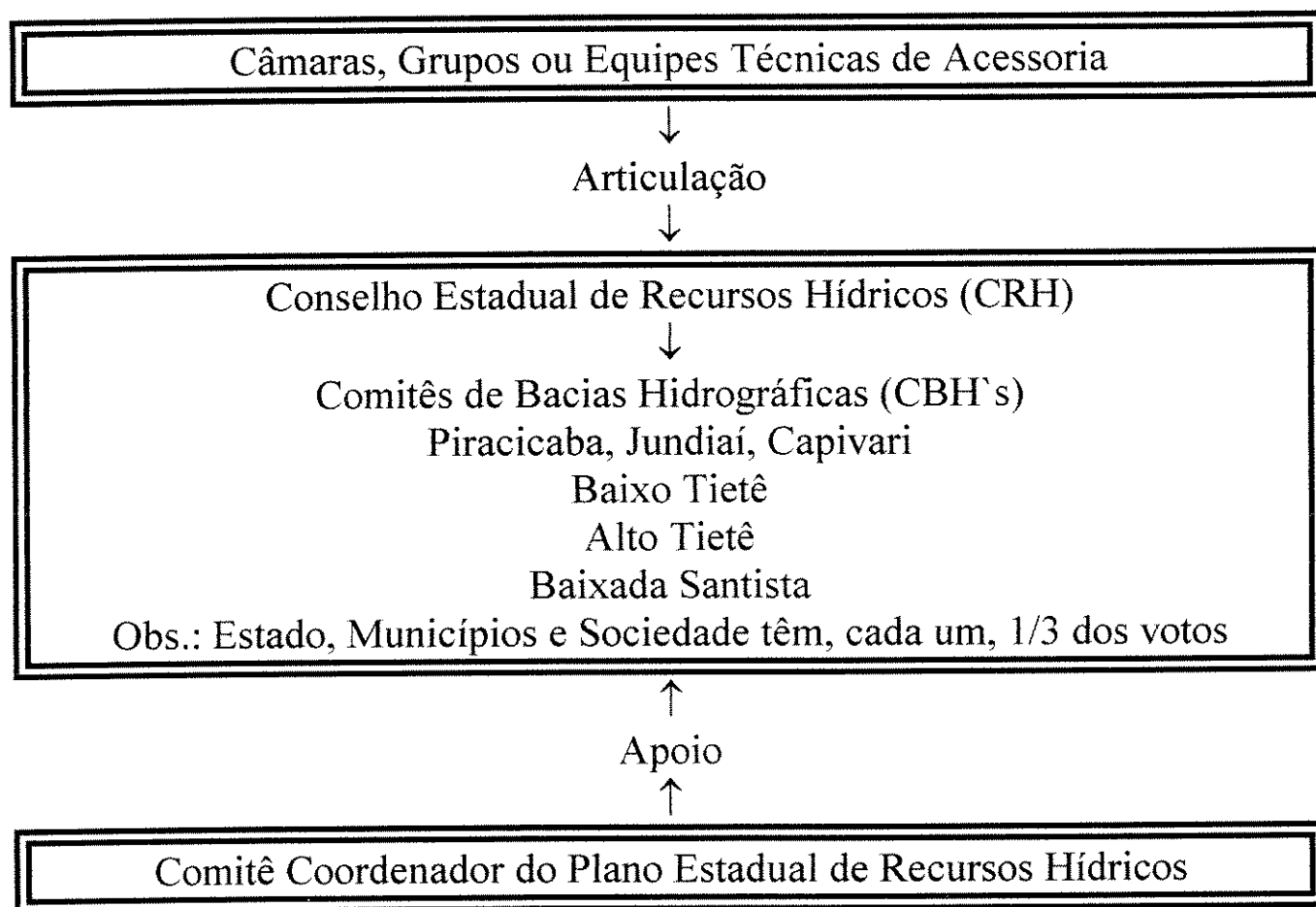
- Princípios:
 - Descentralização, participação, integração.
 - Bacia Hidrográfica como unidade de planejamento e gerenciamento
 - Recurso Hídrico é um bem público. Sua utilização deve ser controlada.
- Implantação:
 - Dividiu-se o Estado em 22 unidades de gerenciamento de recursos hídricos.
- Critérios:
 - Área menor que 25000 km² e extensão aproximada de 300 km.
 - Contingência de aproximadamente 50 municípios.
 - Considerações sobre: divisor de águas, clima, uso do solo, hidrologia, aquíferos e perfil sócio-econômico.
- Mecanismos de implantação:
 - Plano - Define os investimentos.
 - Sistema de gestão - Define participação do estado, municípios e outros.
 - Fundo - Cria suporte financeiro.
- Plano:
 - Planejamento, gerenciamento, etc.
 - Aproveitamento múltiplo das águas.
 - Tratamento de efluentes, controle de poluição, recuperação.
 - Águas subterrâneas.
 - Mananciais de abastecimento urbano.
 - Irrigação.
 - Água na indústria.
 - Controle de inundações.
 - Erosão e assoreamento.
 - Municípios afetados por reservatórios e leis de proteção de mananciais.
- Sistema:

CRH gerencia CBH's.
- Fundo:

FEHIDRO - Fundo Estadual de Recursos Hídricos.
- Programa realizado:
 - 87 - Implantação do CRH.
 - 89 - Constituição de São Paulo
 - 90 - Plano Estadual de Recursos Hídricos de São Paulo.

- 91 - Lei 7663.
- 92 - Cadastro de usuários PCJ.
- 93 - FEHIDRO - Instalação do Comitê PCJ.
- 94 - Cadastro de usuários do Alto Tietê - Instalação de Comitês - Plano Estadual de Recursos Hídricos (Lei 9034).
- 95 - Instalação de Comitês e Bacias e de Câmara Técnica de Racionalização.
- 96 - Plano integrado de aproveitamento e controle, estudos de cobrança, relatório de situação das bacias hidrográficas, discussão referente à criação da agência de bacias.

Órgãos de Coordenação e de Integração Participativa



4.2 - O Problema da Medição de Vazão no Nordeste

Durante o desenvolvimento de nosso trabalho, nos foi apresentado um problema muito comum atualmente no Nordeste brasileiro. Em muitas barragens de regularização ou açudes são utilizadas válvulas dispersoras cônicas para descarga de fundo que não são utilizadas como medidores de vazão, sendo que esta é feita de maneira onerosa e trabalhosa por outros métodos e aparelhos.

O interior do nordeste é a única região brasileira onde significativamente a evapotranspiração potencial supera a precipitação pluviométrica, logo a medição das vazões toma uma grande importância. No nordeste, desde longa data, a ocorrência do clima semi-árido, associado à irregularidade das chuvas – produzindo ora secas, ora enchentes – tem chamado a atenção de governantes e cientistas do ramo.

Segundo dados do recenseamento de 1970, viviam no Polígono das Secas (Figura 4.2), com área de 940.000 km^2 , um total de 17 milhões de habitantes, mas, segundo dados da SUDENE, o fenômeno afeta hoje, no conjunto da região, uma população da ordem de 27 milhões de pessoas numa área de aproximadamente $1.600.000 \text{ km}^2$.

Determinações efetuadas por Rebouças e Marinho indicam um volume médio escoado em todo o Polígono das Secas de $56 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$, enquanto a contribuição de pluviometria anual daria um volume médio de $700 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$. Realizando a diferença entre o escoamento total e a precipitação pluviométrica, resultará numa evapotranspiração da ordem de $642,5 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{ano}$. Resulta pois que, de uma contribuição pluviométrica de 700 bilhões de m^3 , 8% vão alimentar os rios, 0,2% se infiltram até os aquíferos dos terrenos cristalinos e 91,8% são consumidos pelos fenômenos de evaporação e transpiração. Esses valores traduzem a importância das perdas por evapotranspiração.

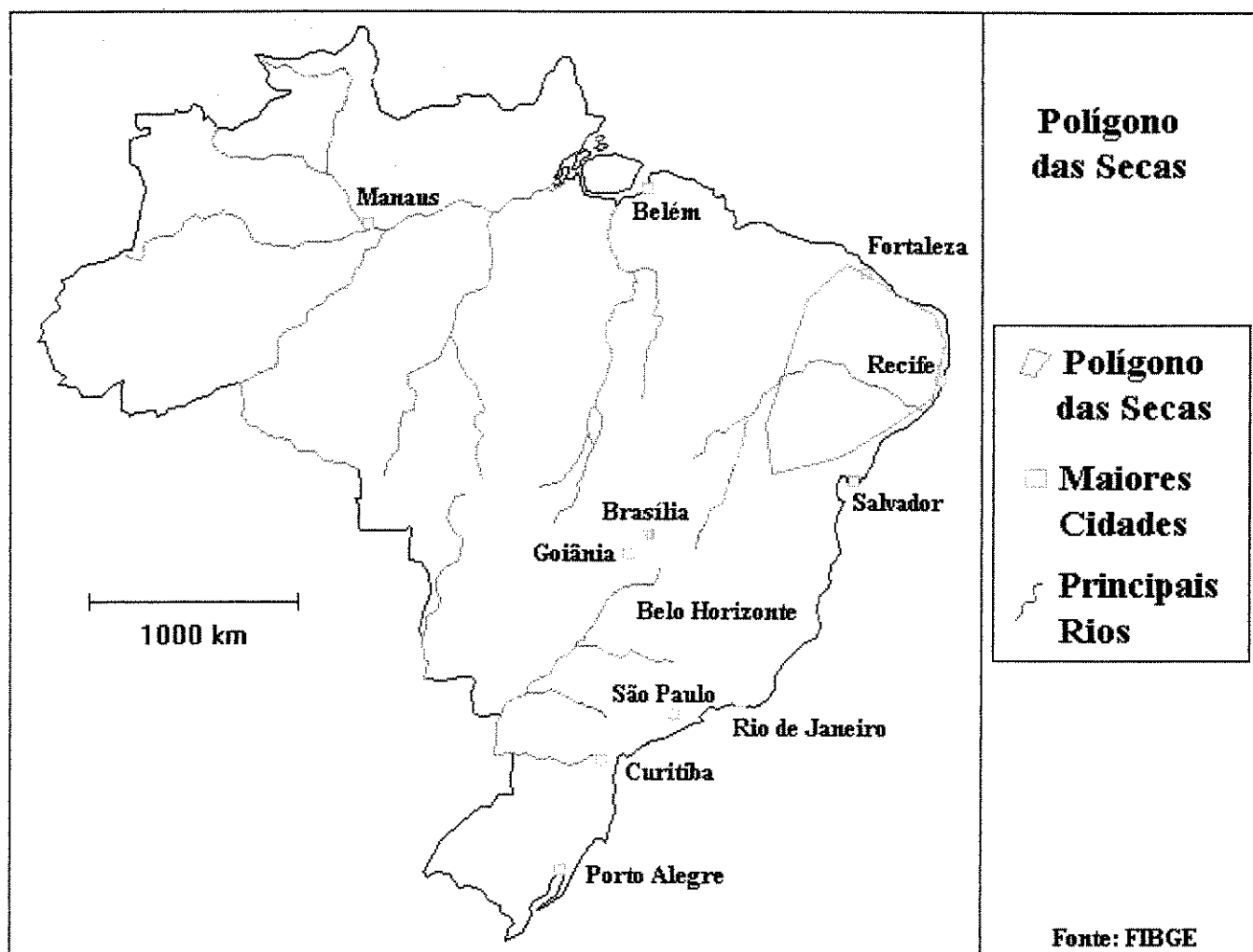


Figura 4.2
Polígono das Secas

Na realidade, o principal efeito das secas é o de agravar uma situação sócio-econômico débil, resultante de uma agricultura de subsistência e de uma baixíssima renda per capita.

Uma boa parte das famílias nordestinas tem uma renda anual entre 200 e 250 dólares (dados da SUDENE constantes do Plano Integrado para o Combate Preventivo dos Efeitos das Secas do Nordeste). Admitindo uma média de quatro a cinco pessoas por família e incluindo o valor dos alimentos produzidos para consumo próprio, chegaremos a uma renda per capita de 40 a 50 dólares por ano. É de fato sobre estas famílias de baixa renda que a seca incide com maior gravidade.

A seca, quando ocorre, ataca organismos sem forças e como consequência direta desta situação, temos os movimentos migratórios do nordeste para o sudeste, para a Amazônia ou para as áreas urbanas da própria Zona da Mata nordestina, principalmente as capitais.

Isto nos leva a crer que a cada dia se torna maior a importância de se controlar o consumo e as suas condições no nordeste, daí a necessidade de se medir a vazão de maneira mais precisa independentemente da quantidade de água existente nos leitos de rios, reservatórios ou açudes.

4.3 - O Projeto Mundaú

Os estudos básicos para a implantação da Barragem do Mundaú se iniciaram no ano de 1953. Foram examinados 15 locais, desenvolvendo-se para cada um, levantamento topográfico do boqueirão e reconhecimento da bacia hidráulica.

O boqueirão a ser selecionado deveria preencher não só os requisitos físicos mas, e principalmente, a preservação da bacia de irrigação, que se expande logo a jusante da cidade de Uruburetama, bem como o traçado de rodovias e ferrovias existentes nas redondezas.

O local que melhor se apresentou para a construção da barragem, que não inundaria áreas de aluvião, foi o boqueirão Cachoeira, localizado 2 km a montante da cidade, permitindo, além do aproveitamento em irrigação, o abastecimento d'água da mesma.

Seguiram-se o levantamento topográfico da bacia hidráulica e as pesquisas de materiais de construção.

O projeto executivo foi iniciado pelo DNOCS em 1963 e em finais de 1986, deu-se início à construção do canteiro de obras, que prosseguiram até 1988, quando também deu-se o enchimento do lago.

A barragem do Açude Mundaú está localizada no município de Uruburetama, estado do Ceará, a 108 km de Fortaleza.

O Rio Mundaú nasce na parte meridional da serra de Uruburetama, tem um curso de 160 km e desemboca no oceano, formando um pequeno estuário. Descendo a serra, percorre um trecho de forte inclinação, quase sempre encachoeirado e com encostas próximas, onde existem bons boqueirões, porém, com bacias de acumulação bastante reduzidas. É considerado perene até a altura da cidade de Uruburetama.

A bacia hidrográfica no local da barragem é de 36,25 km², o lago formado cobre uma área de 125 ha, acumulando um volume de 21 milhões de m³ e regularizando uma vazão de 0,96 m³/s.

A barragem, composta por terra homogênea, tem 36,3 m de altura máxima sobre as fundações e extensão pelo coroamento de 444 m.

O vertedouro da barragem, do tipo soleira espessa, tem largura de 54 m, lâmina máxima de 1 m e descarga máxima calculada em 95,55 m³/s.

Para a descarga de fundo, a partir da tomada d'água segue em tubulação de ferro fundido até o pé da barragem, onde se encontra uma válvula dispersora cônica.

Capítulo V

Desenvolvimento de Novos Conceitos

5.1 - Curva de Descarga

Dá-se a denominação de curva de descarga a uma função, geralmente expressa graficamente, que relaciona todos os possíveis coeficientes de vazão a um parâmetro que indica o grau de abertura da válvula.

Esta curva é obtida por interpolação a partir de alguns coeficientes de vazão geralmente determinados por via experimental.

A documentação existente sobre ensaios realizados no intuito de se obter valores práticos para o coeficiente de vazão nem sempre nos dão valores que têm um pequeno desvio padrão entre si. Neste trabalho procurou-se trabalhar com dados práticos que apresentam pequenos desvios entre si, sendo descartados outros que destoam da maioria (seja pelas condições em que foram obtidos, pelo tipo de válvula, ou por qualquer outro motivo). Foram aproveitados os valores obtidos por Elder e Dougherty (barragens de Chatuge, Nottely, Fontana I, Fontana II, Watauga I, Watauga II), valores recomendados pelo Corps of Engineers (para válvulas de quatro e seis aletas), valores obtidos de modelo no laboratório da E.P.U.S.P. e valores obtidos na barragem de Ponte Nova pela E.P.U.S.P..

Através da superposição de todas as curvas de descarga tornou-se possível a construção do gráfico da Figura 5.1, com máximos e mínimos valores práticos prováveis do coeficiente de descarga. Tal gráfico foi elaborado de maneira que se desprezasse valores com alto desvio padrão, para com isso se obter um erro de $\pm 8 \%$, no máximo. O gráfico foi obtido através de tabelas como a 5.1.

Assim, podemos obter vazões com relativa precisão lançando mão dos valores médios das curvas de máximo e mínimo, conhecidos os dados de altura manométrica, perdas de carga localizadas e distribuídas e diâmetro da válvula, empregando-se a fórmula:

$$Q = \psi S \sqrt{2 g (Z - \Delta H)} \quad [AA]$$

A partir destas fórmulas, foi desenvolvida uma série de tabelas similares à Tabela 5.1, com valores de perdas de carga simuladas, valores médios de coeficientes de vazão e diversas alturas manométricas que podem auxiliar a obtenção de vazão para finalidades que não exijam grande precisão. Tais tabelas podem ser utilizadas, por exemplo, para pré-dimensionamento de projetos ou para comparações com resultados obtidos em calibragens de válvulas dispersoras de médio e grande porte ($0,7 \text{ m} < D < 3 \text{ m}$).

Nota-se uma certa disparidade de resultados quando se leva em conta o número de aletas da válvula, sendo que as curvas das válvulas de seis aletas se aproximam mais da curva de máximos e as curvas das válvulas de quatro aletas se aproximam da curva de mínimos. Recomendamos então que se utilize valores intermediários entre a média e a curva de máximos para as válvulas de seis aletas e valores intermediários entre a média e a curva de mínimos para válvulas de quatro aletas.

Quanto ao diâmetro, quando se nota uma pequena tendência das válvulas maiores elevarem o coeficiente de descarga, recomendamos que se corrija os valores adotados quando da utilização da tabela para válvulas com diâmetros situados entre 0,7 m e 1,5 m (em volta de -3 %, aproximadamente).

s/D	Mínimo	Máximo	Média
0,1	0,1903	0,21111	0,200705
0,11	0,209812	0,232919	0,2213655
0,12	0,229324	0,254728	0,242026
0,13	0,248836	0,276537	0,2626865
0,14	0,268348	0,298346	0,283347
0,15	0,28786	0,320155	0,3040075
0,16	0,307372	0,341964	0,324668
0,17	0,326884	0,363773	0,3453285
0,18	0,346396	0,385582	0,365989
0,19	0,365908	0,407391	0,3866495
0,2	0,38542	0,4292	0,40731
0,21	0,4029891	0,44711	0,42504955
0,22	0,4205582	0,46502	0,4427891
0,23	0,4381273	0,48293	0,46052865
0,24	0,4556964	0,50084	0,4782682
0,25	0,4732655	0,51875	0,49600775
0,26	0,4908346	0,53666	0,5137473
0,27	0,5084037	0,55457	0,53148685
0,28	0,5259728	0,57248	0,5492264
0,29	0,5435419	0,59039	0,56696595
0,3	0,561111	0,6083	0,5847055
0,31	0,5766669	0,624275	0,60047095
0,32	0,5922228	0,64025	0,6162364
0,33	0,6077787	0,656225	0,63200185
0,34	0,6233346	0,6722	0,6477673
0,35	0,6388905	0,688175	0,66353275
0,36	0,6544464	0,70415	0,6792982
0,37	0,6700023	0,720125	0,69506365
0,38	0,6855582	0,7361	0,7108291
0,39	0,7011141	0,752075	0,72659455
0,4	0,71667	0,76805	0,74236
0,41	0,729031	0,779162	0,7540965
0,42	0,741392	0,790274	0,765833
0,43	0,753753	0,801386	0,7775695
0,44	0,766114	0,812498	0,789306
0,45	0,778475	0,82361	0,8010425
0,46	0,790836	0,834722	0,812779
0,47	0,803197	0,845834	0,8245155
0,48	0,815558	0,856946	0,836252
0,49	0,827919	0,868058	0,8479885
0,5	0,84028	0,87917	0,859725
0,51	0,838252	0,877753	0,8580025
0,52	0,836224	0,876336	0,85628
0,53	0,834196	0,874919	0,8545575
0,54	0,832168	0,873502	0,852835
0,55	0,83014	0,872085	0,8511125
0,56	0,828112	0,870668	0,84939
0,57	0,826084	0,869251	0,8476675

Tabela 5.1 – Coeficientes Experimentais

Valores Limites Práticos do Coeficiente de Descarga para Médias e Grandes Vazões

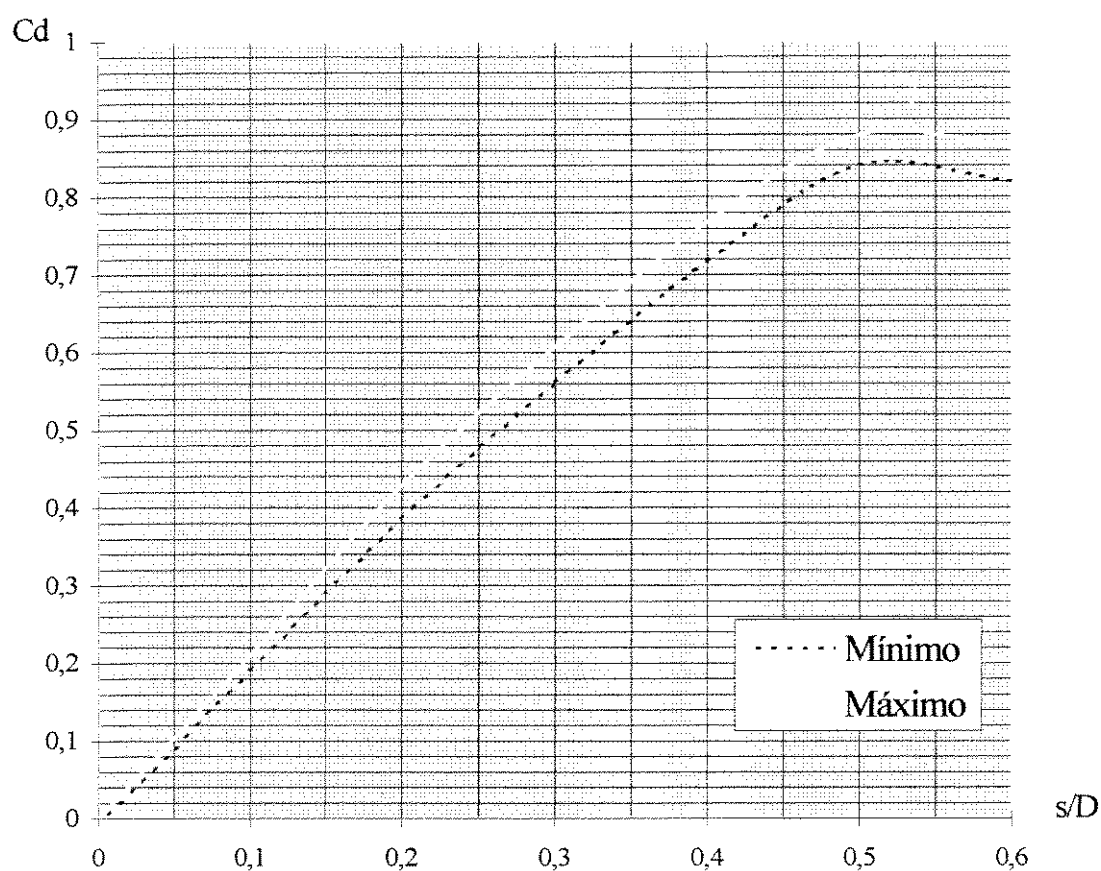


Figura 5.1
Valores Limites Práticos dos Coeficientes de Descarga para Médias e Grandes Vazões

5.2 - O Efeito de Escala

A válvula dispersora cônica é um dispositivo extremamente simples. Desprezando-se pequenos detalhes de fabricação, pode-se supor que existe no mundo apenas uma "família" destas válvulas.

Sendo então todas geometricamente semelhantes, as diferenças que se notam entre os seus coeficientes de vazão têm que serem explicadas pelo "efeito de escala". Este assunto foi objeto da publicação de Bonilha na tese apresentada à E.P.U.S.P. em 1972.

Geralmente, no estudo de efeito de escala, as razões que levam a divergências entre parâmetros hidráulicos do modelo e do protótipo só podem ser explicadas, porém não se encontram relações matemáticas que permitam o cálculo de um parâmetro relativo ao protótipo a partir do mesmo parâmetro determinado para o modelo. São os chamados "aspectos qualitativos" do efeito de escala.

Em raros casos conseguiu-se encontrar uma fórmula matemática que permite a correção numérica do valor de um parâmetro hidráulico obtido por meio de ensaios efetuados com um modelo, transformando-o para ser utilizado como parâmetro do protótipo. Estas fórmulas baseiam-se nos "aspectos quantitativos do efeito de escala". No caso das turbinas hidráulicas, por exemplo, existem diversas fórmulas de efeito de escala que permitem avaliar o rendimento de uma máquina a partir do rendimento encontrado para o seu modelo.

No caso da válvula dispersora cônica, já foi possível encontrar uma fórmula de efeito de escala relacionando os dados publicados por Elder e Dougherty com os dados obtidos num ensaio das válvulas da Barragem de Ponte Nova que teve os coeficientes obtidos no estudo de um modelo que foi ensaiado no Centro Tecnológico de Hidráulica de São Paulo.

Para ampliar o conhecimento do efeito de escala nos seus aspectos qualitativos e quantitativos, o que era imprescindível para alcançar o objetivo deste trabalho, foi necessário agregar aos dados existentes em outras publicações novos dados experimentais.

Assim, com a colaboração da FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos), COGERH (Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará) e financiamento do MCT (Ministério da Ciência e Tecnologia), ensaiou-se no campo a válvula protótipo de 500 mm que guarnece o Açude Mundaú, situado no Ceará. Na Fec-Unicamp ensaiou-se um modelo de 100

mm fazendo-se variar as aberturas ao longo de todo o curso útil propiciado pela camisa da válvula, disponível no seu laboratório de Hidráulica.

Para que melhor se compreenda o avanço propiciado por estes novos dados no conhecimentos do efeito de escala, há a necessidade de explicar as etapas anteriores o que, resumidamente, será feito a seguir.

5.3 - Avanços Sucessivos no Conhecimento do Efeito de Escala.

5.3.1 - Primeira etapa - Gráficos do Corps of Engineers

Ainda que não se referindo exatamente a "efeito de escala", podem ser citados dois gráficos publicados pelo Corps of Engineers: Hydraulic Design Chart 332-1 (Figura 5.2) e 332-1/1 (Figura 5.3), nos quais se encontram duas curvas de melhor aderência obtidas a partir de dados resultantes de ensaios em protótipo e em modelos.

Uma das curvas (Figura 5.2) refere-se a dados de 4 válvulas de menor diâmetro, entre 1,5 m e 2 m, e está indicado para ser utilizado com válvulas de 4 aletas.

A outra curva (Figura 5.3) refere-se também a 4 válvulas, porém de maiores diâmetros, entre 2,15 m e 2.5 m, e contém a indicação de que é apropriado para válvulas de 6 aletas.

Dos Gráficos das Figuras 5.2 e 5.3 foram extraídos os dados para a construção das Tabelas 5.2 e 5.3, respectivamente.

Naquela época, não era comum aos engenheiros hidráulicos a utilização de conceitos da mecânica dos fluidos e portanto estes gráficos foram traçados a partir de pontos correspondentes e coeficientes práticos. Pelo mesmo motivo não se cogitou de relacionar estes coeficientes como o número de Reynolds.

No entanto, através destas simples confrontações de valores de coeficientes de válvulas de diferentes tamanhos, o Corps of Engineers pôde perceber que os coeficientes das válvulas de maiores diâmetros eram maiores do que os coeficientes das válvulas de menores diâmetros. Com os dados dos coeficientes E das Tabelas 5.2 e 5.3 é possível compará-los com os valores apresentados no capítulo 5.5.1, mesmo não sendo aproveitados, pelo motivo das diferenças de diâmetro.

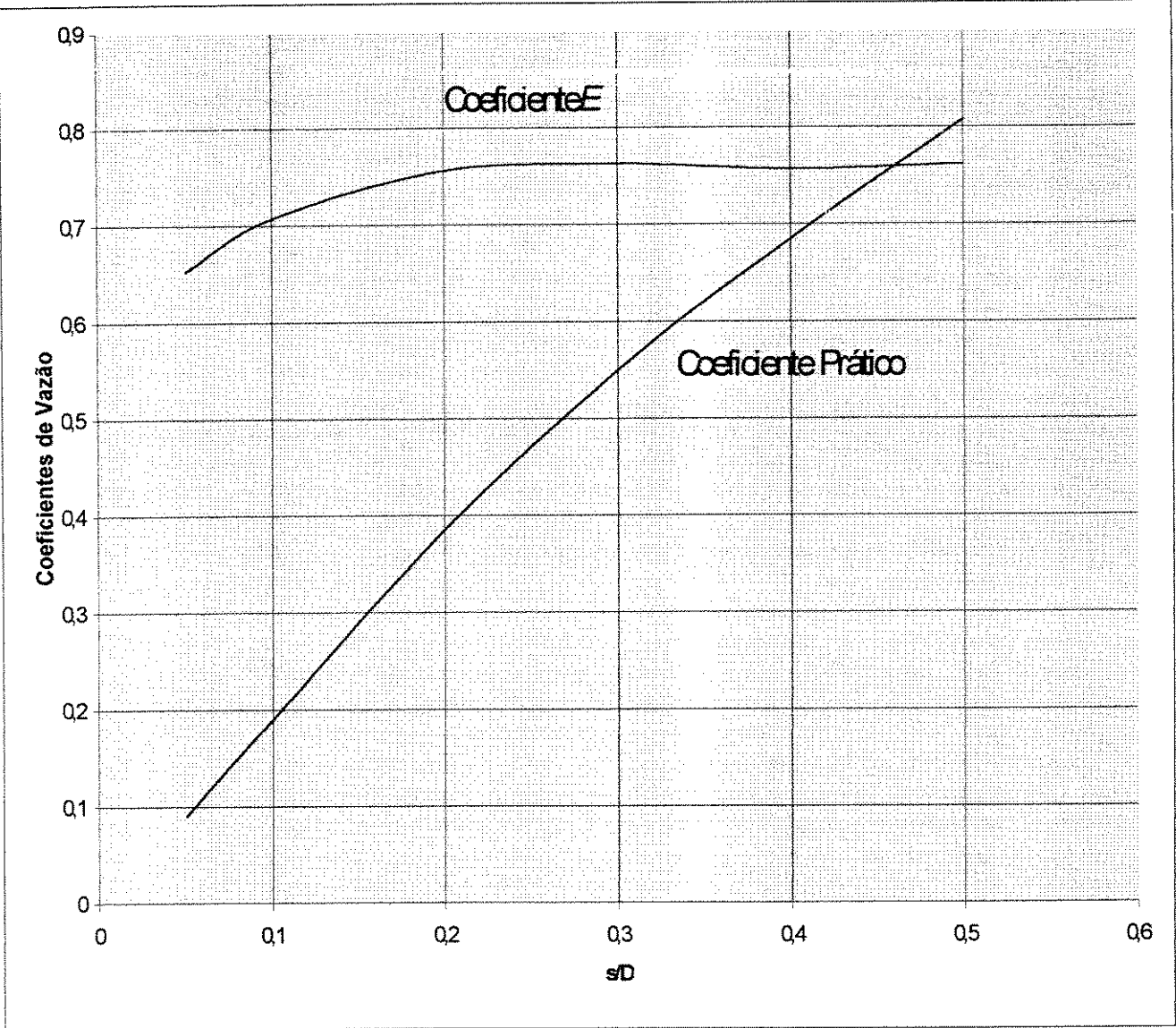


Figura 5.2
Coeficientes E e ψ para 4 Aletas

s/D	ψ	E
0,05	0,090	0,653
0,10	0,190	0,707
0,20	0,385	0,756
0,30	0,550	0,763
0,40	0,685	0,757
0,50	0,808	0,762

Tabela 5.2
Coeficientes para Válvulas de 4 Aletas

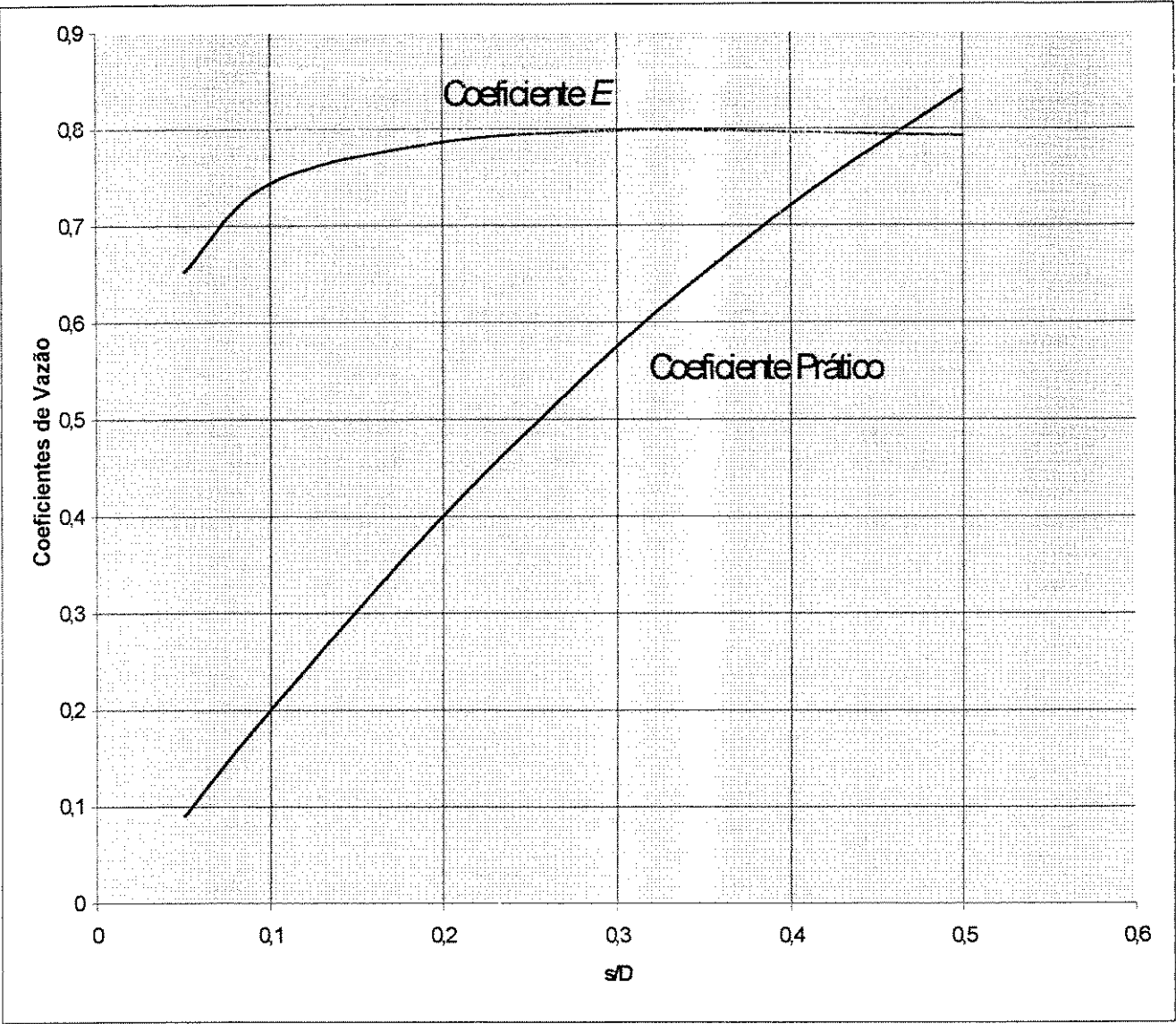


Figura 5.3
Coeficientes E e ψ para 6 Aletas

s/D	ψ	E
0,05	0,090	0,653
0,10	0,200	0,744
0,20	0,400	0,786
0,30	0,575	0,798
0,40	0,720	0,796
0,50	0,840	0,792

Tabela 5.3
Coeficientes para Válvulas de 6 Aletas

5.3.2 - Segunda etapa - Utilização dos conceitos da mecânica dos fluidos

Com base nos mesmos dados utilizados pelo Corps of Engineers, porém expressos na forma de números de Euler, foi possível perceber que a variação do coeficiente de vazão em função do número de Reynolds obedece a mesma lei de variação do coeficiente de resistência da placa plana observada no gráfico da Figura 3.4. Este fato, fundamental para as conclusões deste trabalho, pode ser percebido facilmente comparando-se os valores dos coeficientes de vazão obtidos no laboratório de Hidráulica da EPUSP (por Bonilha e por Souza Pinto), indicados na Tabela 5.4 e 5.5, como uma função do número de Reynolds. É bom citar que os valores sublinhados das tabelas 5.4, 5.5, 5.6 e 5.7 só serão utilizados nas próximas etapas.

Assim, a partir desta correlação entre o coeficiente de vazão e o coeficiente de resistência da placa plana e, examinando-se muitos dados encontrados na literatura especializada, como os coeficientes de Elder e Dougherty a respeito de Fontana e Nottely apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, pode-se concluir:

Pretendendo trabalhar com a Semelhança de Froude, as escalas geométricas escolhidas para os modelos nos Laboratórios de muitos países são tais que os coeficientes de vazão determinados sempre correspondem a números de Reynolds entre 200.000 e 600.000. Transformando os coeficientes práticos em números de Euler, percebe-se que os valores obtidos em todos os ensaios são praticamente constantes, pois se aproximam do patamar correspondente à média dos pontos obtidos por Blasius. Este patamar, prolongado paralelamente ao eixo das abcissas cruza a faixa de pontos da equação de Karman-Schoenherr num ponto que corresponde a valores de Reynolds entre 30.000.000 e 40.000.000 como pode-se observar no gráfico da Figura 3.4.

Os coeficientes de válvulas protótipo que foram publicados, sempre correspondente a grandes válvulas e portanto a altos números de Reynolds. Ajustam-se à lei de variação correspondente à equação de Karman-Schoenherr.

Pôde-se concluir também que o valor do coeficiente de vazão obtido em laboratório é igual ou inferior ao do protótipo, se a este corresponder números de Reynolds superiores a esta faixa entre 30.000.000 e 40.000.000. Caso contrário, para Reynolds de protótipos inferiores a esta faixa, o valor do coeficiente do modelo é maior do que o do protótipo.

<i>H</i> (m)	<i>Q</i> (l/s)	<i>ψ</i>	<i>E</i>	<i>ℜ</i>
0,2	11,0	0,708	0,746	0,145
0,4	16,3	0,742	0,781	0,214
0,6	20,3	0,754	0,795	0,267
0,8	23,6	0,759	0,800	0,310
1,0	26,6	0,766	0,806	0,350
1,2	29,2	0,765	0,805	0,383
1,4	31,4	0,764	0,805	0,413
1,6	33,4	0,760	0,801	0,439
1,8	35,2	0,755	0,795	0,463
2,0	37,0	0,753	0,793	0,487
2,2	38,6	0,749	0,789	0,508
2,4	40,1	0,745	0,785	0,527
2,6	41,6	0,743	0,782	0,548
2,8	43,0	0,740	0,779	0,566
3,0	44,0	0,731	0,770	0,578
3,2	45,2	0,727	0,766	0,594
3,4	46,4	0,724	0,763	0,610
3,6	47,5	0,721	0,759	0,625
3,8	48,4	0,715	0,753	0,637
4,0	49,4	0,711	0,749	0,650
4,2	50,3	0,706	0,744	0,661
4,4	51,3	0,704	0,741	0,675
4,6	52,1	0,699	0,736	0,685
4,8	52,9	0,695	0,732	0,696

Tabela 5.4

Valores de $\Re = \frac{\psi \sqrt{2gH}}{\nu} D \times 10^{-6}$;*s/D*=0,43 – Modelo EPUSP 1972

<i>s/D</i>	<i>ψ</i>	<i>E</i>
0,1	0,2036	0,7576
0,2	0,3588	0,7048
0,3	0,5354	0,7426
0,4	0,6751	0,7460
0,465*	0,7359	0,7290

Tabela 5.5

Coeficientes de Summit Control - EPUSP

*Número de Reynolds para a abertura máxima(*s/D*=0,465): 271.000

s/D	E
0,1	0,735
0,2	0,758
0,3	0,780
0,4	0,801
0,5	<u>0,805</u>

Tabela 5.6
Coefficientes de Nottely

s/D	E
0,1	0,750
0,2	0,788
0,3	0,826
0,4	0,852
0,5	<u>0,860</u>

Tabela 5.7
Coefficientes de Fontana

Verificou-se que existe um outro patamar, o dos pontos de Gebers, que corresponde a valores de Reynolds entre 1.000.000 e 10.000.000. Não encontrou-se na literatura técnica relatos de ensaios com válvulas protótipos ou modelos que tivessem atingido valores de número de Reynolds desta ordem de grandeza, pois a preocupação dos pesquisadores que trabalham com a Escala de Froude limita-se a evitar o regime laminar e portanto escolher uma escala geométrica que leve a valores deste número acima de um mínimo pré-determinado.

Nos ensaios do modelo EPUSP, que teve como objetivo pesquisar a influência do número de Reynolds, o máximo valor que pôde ser atingido foi da ordem de 500.000. Deve-se lembrar que este máximo fica não só limitado pela escala geométrica escolhida, como também pela carga hidráulica disponível no laboratório.

A referência sobre efeito de escala proposta nesta etapa e apresentada na publicação de Bonilha de 1979 que se refere à Barragem Ponte Nova, apresenta uma certa complexidade que dificulta a sua aplicação na prática. No entanto, os ajustes propiciados por ela e o confronto dos valores ajustados com os valores medidos, tal como se pode observar nas tabelas seguintes, foram valiosos para chegar-se a novas fórmulas, muito mais simples e mais apropriadas para as aplicações à Engenharia.

5.3.3 - Terceira etapa. Evolução alcançada neste trabalho

- Aspectos qualitativos referentes à instalação

Constatou-se que aspectos qualitativos que antes não tinham sido abordados por parecerem irrelevantes passaram a ter muita importância para esta etapa de evolução do conhecimento do efeito de escala. Isto porque os principais dados de campo utilizados nos estudos anteriores, tais como os coeficientes determinados por Elder e Dougherty e os ensaios de Laboratório que fundamentaram a fórmula publicada no trabalho da Barragem Ponte Nova, trataram de válvulas que descarregavam dentro de câmaras, sendo que as válvulas mais apropriadas para a medição de vazão são as que descarregam ao ar livre.

Desta forma, tendo constatado que o tipo de instalação da válvula influi significativamente no valor do coeficiente de vazão, três fórmulas de efeito de escala devem ser determinadas, pois três tipos de instalação são possíveis:

- Válvula descarregando dentro de câmaras
- Válvula descarregando ao ar livre
- Válvula afogada

No caso em que a válvula descarrega dentro de câmara, observa-se no interior desta uma acentuada depressão provocada pelo arraste de ar. Esta depressão não é considerada no cálculo da carga hidráulica, que portanto é adotada com valor menor que o real, acarretando em consequência um incremento no coeficiente de vazão que o afasta de seu valor teórico. Além disto, o arraste de ar, peculiar a esse tipo de instalação, leva a aberturas s/D muito superiores às que podem ser imaginadas em um cálculo teórico.

A precisão dos coeficientes das válvulas instaladas nestas condições é portanto inferior a que pode ser alcançada no caso das instalações ao ar livre.

Da mesma forma, no cálculo das válvulas afogadas, não se considera a perda de carga a jusante da saída da válvula. A carga hidráulica considerada é portanto menor e o coeficiente de vazão maior que o teórico.

A partir destas considerações de cunho qualitativo, chegou-se à conclusão de que as válvulas a serem consideradas como medidores de vazão devem descarregar

ao ar livre. Além disto, neste trabalho, considerou-se também como outra condição essencial o fato de que a válvula deva estar funcionando com abertura s/D bem inferior a um limite máximo, s/D menor que 0,4, por exemplo.

- **Aspectos quantitativos. Linearização**

Dentro da aproximação numérica que se consegue experimentalmente, tanto no campo como nos laboratórios, a curva de Karman-Schoenherr pode ser interpretada como sendo uma reta.

Assim, o coeficiente de vazão na forma de número de Euler deverá ser calculado por uma expressão do tipo:

$$E = \alpha + \beta \log \Re \quad \quad \quad [AB]$$

Sendo $\Re$ o número de Reynolds.

- **Necessidade de novos dados de campo e de laboratório**

Examinando-se os estudos anteriores, verificou-se que para estender a fórmula de efeito do escala ao campo das válvulas protótipo de pequeno e médio porte seriam necessários novos dados de campo de laboratório.

Verificou-se posteriormente que estando a Funceme (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) empenhada em melhorar a precisão das medidas das vazões descarregadas dos açudes, havia mútuo interesse na execução destes ensaios de campo.

Após entendimentos com esta entidade, estes ensaios de campo foram realizados com a participação do Autor desta Dissertação e do Professor Orientador. Os resultados deste trabalho de campo foram fundamentais para o desenvolvimento e conclusões deste trabalho.

- **Determinação experimental da curva de vazão da válvula do Açude Mundaú**

A determinação experimental da curva de vazão da válvula do Açude Mundaú envolveu uma série de etapas, que estão descritas a seguir.

A primeira etapa para a foi a obtenção dos dados de campo. Estes dados podem ser visualizados na Tabela 5.8.

<i>Abertura</i>	<i>s(cm)</i>	<i>Nº de voltas</i>	<i>s/D</i>	<i>Q(m³/s)</i>
0%	0	0	0	0
20%	5,781	290	0,1156	0,8524
30%	8,231	410	0,1646	1,4799
50%	13,132	650	0,2626	1,7621
70%	18,441	910	0,3688	1,8762
90%	23,546	1160	0,4709	2,2531

Tabela 5.8
Vazões Calculadas - Mundaú

A segunda etapa foi obter a perda de carga na tubulação e tomada d’água:

$$\Delta H = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \qquad \text{[AC]}$$

Sendo que :

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,8 \cdot \log \frac{R}{R \frac{k}{D} + 7} \qquad \text{[AD]}$$

$$R = \frac{\frac{Q}{\pi \cdot D^2 / 4} \cdot D}{v} \qquad \text{[AE]}$$

$$\lambda = 0,25 \frac{v^2}{2g} \qquad \text{[AF]}$$

, onde k = 0,000005.

Com isso, é possível obter os valores do coeficiente de vazão E , através das fórmulas:

$$S = \pi \cdot s \cdot \text{sen } \alpha \cdot (D - 0,5 \cdot s \cdot \text{sen } 2 \alpha) \qquad \text{[AG]}$$

$$E = \frac{Q}{S \sqrt{2 g H}} \qquad \text{[AH]}$$

Então torna-se possível construir a tabela 5.9:

Abertura(%)	s/D	Q(m³/s)	S(m²)	ΔH+λ(m)	H(m)	E
20	0,1156	0,8524	0,0605	0,6502	23,594	0,655
30	0,1646	1,4799	0,0839	1,9600	22,284	0,840*
50	0,2626	1,7621	0,1267	2,7786	21,465	0,678
70	0,3688	1,8762	0,1671	3,1501	21,094	0,552
90	0,4709	2,2531	0,2000	4,5424	19,702	0,573

Tabela 5.9
Coefficientes E - Mundaú

Os valores da abertura 30% (*) foram descartados por não apresentarem resultados consistentes.

Com os valores de E obtidos, conseguimos então valores para serem comparados com dados de outros trabalhos, sejam experimentais ou modelos e assim se obter conclusões quanto à consistência dos dados coletados.

A terceira etapa se constitui na obtenção dos números de Reynolds. Para isto se utiliza a fórmula:

$$\Re = \frac{\psi D \sqrt{2 g H}}{\nu} \qquad \text{[AI]}$$

Assim pode-se construir a tabela 5.10:

<i>Abertura(%)</i>	<i>s/D</i>	<i>k</i>	<i>E</i>	<i>ψ</i>	<i>H(m)</i>	<i>$\mathcal{R}$</i>
20	0,1156	3,2460	0,655	0,2018	23,594	2.170.908
50	0,2626	1,5499	0,678	0,4374	21,465	4.488.112
70	0,3688	1,1754	0,552	0,4696	21,094	4.776.690
90	0,4709	0,9820	0,573	0,5835	19,702	5.736.084

Tabela 5.10
Números de Reynolds - Mundaú

- Determinação da curva de vazão do modelo FEC**

Analogamente às etapas anteriores foram constituídos os dados do modelo FEC. Na tabela 5.11 são determinadas as vazões.

<i>Ensaio</i>	<i>s(cm)</i>	<i>Nº de voltas</i>	<i>s/D</i>	<i>$Q(m^3/s)$</i>
1	0	0	0	0
2	0,003762	3	0,03762	0,01236
3	0,007524	6	0,07524	0,02165
4	0,011286	9	0,11286	0,02903
5	0,015048	12	0,15048	0,03464
6	0,01881	15	0,1881	0,03891
7	0,022572	18	0,22572	0,04237
8	0,026334	21	0,26334	0,04489
9	0,030096	24	0,30096	0,04683
10	0,033858	27	0,33858	0,04832
11	0,03762	30	0,3762	0,04956
12	0,041382	33	0,41382	0,05056
13	0,045144	36	0,45144	0,05074
14	0,048906	39	0,48906	0,05077

Tabela 5.11
Vazões Calculadas - FEC

Na Tabela 5.12 são determinados os coeficientes E .

<i>Ensaio</i>	<i>s/D</i>	<i>Q(m³/s)</i>	<i>S(m²)</i>	<i>ΔH+λ(m)</i>	<i>H(m)</i>	<i>E</i>
1	0	0	-	-	-	-
2	0,0376	0,0124	0,00099	0,761	14,804	0,7335
3	0,0752	0,0217	0,00194	2,334	13,232	0,6912
4	0,1129	0,0290	0,00287	4,196	11,369	0,6784
5	0,1505	0,0346	0,00375	5,977	9,588	0,6732
6	0,1881	0,0389	0,00461	7,540	8,025	0,6733
7	0,2257	0,0424	0,00543	8,941	6,624	0,6851
8	0,2633	0,0449	0,00621	10,034	5,531	0,6937
9	0,3010	0,0468	0,00696	10,922	4,643	0,7047
10	0,3386	0,0483	0,00768	11,626	3,939	0,7155
11	0,3762	0,0496	0,00837	12,230	3,335	0,7323
12	0,4138	0,0506	0,00902	12,728	2,837	0,7516
13	0,4514	0,0507	0,00963	12,821	2,744	0,7179
14	0,4891	0,0508	0,01022	12,835	2,730	0,6790

Tabela 5.12
Coeficientes E - FEC

A obtenção dos coeficientes k , coeficientes ψ e dos números de Reynolds pode ser visualizada na Tabela 5.13.

<i>Ensaio</i>	<i>s/D</i>	<i>k</i>	<i>E</i>	<i>ψ</i>	<i>H(m)</i>	<i>Re</i>
1	0	-	-	-	-	-
2	0,0376	9,5782	0,7335	0,0766	14,804	130.516
3	0,0752	4,8827	0,6912	0,1416	13,231	228.092
4	0,1129	3,3200	0,6784	0,2043	11,369	305.188
5	0,1505	2,5407	0,6732	0,2650	9,588	363.412
6	0,1881	2,0747	0,6733	0,3245	8,025	407.210
7	0,2257	1,7656	0,6851	0,3880	6,624	442.359
8	0,2633	1,5462	0,6937	0,4487	5,531	467.416
9	0,3010	1,3828	0,7047	0,5096	4,643	486.378
10	0,3386	1,2570	0,7155	0,5692	3,939	500.409
11	0,3762	1,1575	0,7323	0,6327	3,335	511.769
12	0,4138	1,0773	0,7516	0,6977	2,837	520.518
13	0,4514	1,0115	0,7179	0,7098	2,744	520.772
14	0,4891	0,9569	0,6790	0,7095	2,730	519.325

Tabela 5.13
Números de Reynolds - FEC

5.4 - A Influência do Ar nas Válvulas Dispersoras Cônicas

Apesar de a princípio acharmos ser grande a influência do ar no coeficiente de vazão prático das válvulas dispersoras, esta não se revelou acentuada nos levantamentos de campo em válvula com descarga ao ar livre. Tal influência se mostrou mais relevante nas válvulas com descarga em câmaras, segundo a publicação *Curvas Características de Descarga das Válvulas Dispersoras do Tipo Howell-Bunger*, por Bonilha.

No Projeto Mundaú Foram realizadas medições de subpressão do ar na extremidade da válvula para que fossem comparadas com as realizadas em laboratório. Para isso tomou-se por referência um ponto interno e um ponto externo ao jato. Verificou-se uma subpressão maior no interior do jato no começo da abertura da ordem de 4 mm, que se manteve praticamente constante até a abertura máxima. Também foi observada uma depressão de 0 a 17 mm no ponto externo, que começou a surgir a partir de 50 % da abertura.

Estas depressões colaboram para a aproximação dos coeficientes de vazão das válvulas instaladas em câmaras e com defletores com os coeficientes das válvulas que descarregam ao ar livre, mas de maneira pouco influente, assim como na verificação da precisão do coeficiente prático, que não se demonstraria influenciado pela subpressão. Em outras pesquisas, envolvendo tipos de descarga diferentes (em câmara ou com defletores), verificaram-se subpressões da ordem de até 250 mm.

Com os valores de subpressão obtidos no Projeto Mundaú, tornou-se desnecessário repetir o processo de medição no modelo do laboratório, pois os valores a serem encontrados seriam muito baixos.

5.5 – Variação do Coeficiente de Vazão com o Número de Reynolds

A relação entre coeficiente de vazão e número de Reynolds nos ajuda a entender a variação de E encontrada nas válvulas dispersoras. Obteve-se, através de certos estudos, dados para serem realizadas comparações e daí chegar-se a certas conclusões.

5.5.1 - Determinação de novas fórmulas de Efeito de Escala

- Válvulas que descarregam dentro de câmaras

A determinação dos valores dos coeficientes α e β foi feita considerando os coeficientes para as máximas aberturas das válvulas de Fontana e de Nottely, respectivamente $E = 0,860$ e $E = 0,805$.

Assim foi obtida a expressão :

$$E = -1,2695 + 0,2694 \log \Re \quad \text{[AJ]}$$

Válida para válvulas que descarregam em câmaras.

Utilizando esta expressão e o valor de $E = 0,805$, correspondente ao patamar dos pontos de Blasius, valor este determinado em ensaios em modelo, determinou-se um valor preciso para o número de Reynolds, correspondente à projeção deste patamar na reta determinada pela equação [AJ].

O valor obtido foi:

$$\Re = 50.000.000 \quad \text{[AK]}$$

- Válvulas que descarregam ao ar livre

Para a obtenção da fórmula correspondente às válvulas que descarregam ao ar livre, pôde-se escolher entre médias de dados experimentais obtidos em laboratório, correspondentes a estudos das válvulas de Summit Control, Peruca e os obtidos especialmente para esta Dissertação no Laboratório de Hidráulica da Fec-

Unicamp, assim como médias de valores calculados a partir da teoria do potencial, a seguir apresentadas.

- Média dos coeficientes obtidos para o modelo de Summit Control = 0,736
- Média dos coeficientes obtidos para o modelo de Peruca = 0,743
- Média de valores obtidos a partir da teoria do potencial de velocidades:
- Média de valores de s/D entre 0 e 0,5 = 0.741
- Média de valores de s/D entre 0 e 0,4 = 0.744
- Valores constantes de s/D entre 0 e 0,3 = 0,746
- Média dos coeficientes obtidos no laboratório da Fec-Unicamp = 0,702, sendo o coeficiente máximo = 0,752

Os resultados provêm dos únicos dados de válvula protótipo descarregando ao ar livre agora disponível, os do Açude Mundaú e os de três ensaios em modelo, que se tem conhecimento.

Confrontando estes valores experimentais e teóricos que apresentam muito pouca diferença, adotou-se o valor 0,744, média dos valores teóricos até a abertura $s/D = 0,4$ para o cálculo dos coeficientes α e β , na condição de válvulas descarregando ao ar livre.

Desta forma obteve-se a equação:

$$0,744 = \alpha + 0,2694 \log 50.000.000 \quad [\text{AL}]$$

A partir da qual chegou-se ao valor do coeficiente α :

$$\alpha = - 1,3305 \quad [\text{AM}]$$

O coeficiente $\beta = 0,2694$ foi mantido constante de acordo com a hipótese de que a única influência na variação do coeficiente de vazão advém da variação do coeficiente de resistência da placa plana. De fato, a influência do fenômeno de arraste de ar, a menos por diferenças de segunda ordem, pode ser considerada como igual

para os coeficientes relacionados às válvulas que descarregam dentro de câmaras e portanto os seus efeitos são iguais para todas estas válvulas e independem do número de Reynolds. Os resultados numéricos dos ensaios da válvula de Mundaú confirmaram esta hipótese.

A equação para as válvulas que descarregam ao ar livre é portanto:

$$E = -1,3305 + 0,2694 \log \Re \qquad \text{[AN]}$$

Válida para o intervalo:

$$10.000.000 < \Re < 80.000.000 \qquad \text{[AO]}$$

- Válvula afogada

Para a válvula afogada não se dispõe de dados de laboratório e como dados de protótipo dispõe-se apenas dos resultados dos ensaios de campo da válvula da Barragem de Ponte Nova, apresentados na Tabela 5.14.

<i>s/D</i>	<i>E</i>
0,11	0,210
0,24	0,453
0,37	0,647
0,50	0,808

Tabela 5.14
Coeficientes de Ponte Nova

Estes dados ainda não são suficientes para determinar a equação da reta correspondente a este tipo de instalação.

5.5.2 - Apresentação gráfica das fórmulas de efeito de escala

A apresentação gráfica das fórmulas obtidas juntamente com os dois patamares correspondentes aos pontos de Blasius e de Gebers facilitam a compreensão do efeito de escala no caso das válvulas dispersoras cônicas (Figura 5.4). Como exemplo de aplicação do gráfico, nele indicou-se o procedimento para a determinação do coeficiente E correspondente à válvula do Açude Mundaú.

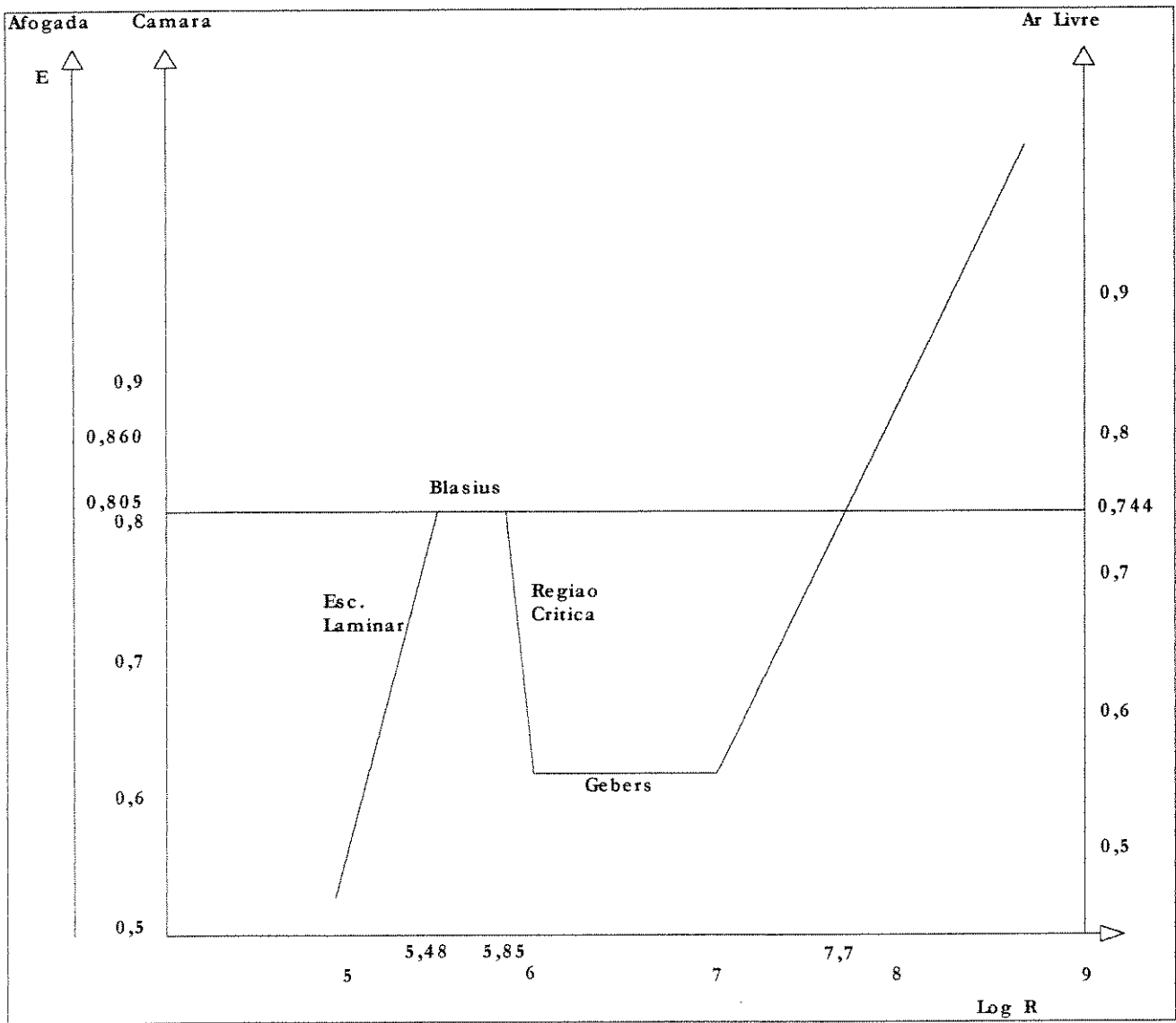


Figura 5.4
Representação Gráfica dos Patamares

5.5.3 - Cálculo analítico do coeficiente E do Açude Mundaú

$$E = \frac{Q}{S\sqrt{2gH}} \quad [\text{AP}]$$

$$E = \frac{2,2531}{0,2\sqrt{2.9,81.19,702}} \quad [\text{AQ}]$$

$$E = 0,573 \quad [\text{AR}]$$

5.5.4 - Cálculo do número de Reynolds no caso da abertura máxima da válvula

$$\Re = \frac{\psi\sqrt{2gH}}{\nu} D \quad [\text{AS}]$$

$$\Re = \frac{0,5835\sqrt{2.9,81.19,702}}{10^{-6}} 0,5 \quad [\text{AT}]$$

$$\Re = 5.736.084 \quad [\text{AU}]$$

No gráfico da Figura 5.4 pode-se ver que este número de Reynolds, compreendido no intervalo entre 1.000.000 e 10.000.000, corresponde ao patamar dos pontos de Gebers.

Este patamar cruza a reta correspondente à equação [AN] justamente no ponto onde $R = 10.000.000$.

Formando-se a seguinte equação:

$$E = 1,3305 + 0,2694 \log 10.000.000 \quad [\text{AV}]$$

Obtém-se assim o valor de E para o Açude Mundaú partindo-se da fórmula de efeito de escala, com base em ensaios de laboratório e na teoria do potencial de velocidades.

$$E_{\text{Mundaú}} = 0,555 \quad [\text{AW}]$$

Este valor independe da abertura s/D da válvula, pois corresponde a um patamar de valores constantes do coeficiente de resistência da placa plana, o patamar dos pontos de Gebers.

5.5.5 - Confronto entre os valores experimentais de E e o valor obtido pela fórmula de efeito de escala.

- Valores experimentais obtidos no campo - Válvula do Açude Mundaú

Média de 4 valores de $E_{\text{Mundaú}}$: $E = 0,615$

Média de 3 valores de $E_{\text{Mundaú}}$: $E = 0,595$

Média de 2 valores de $E_{\text{Mundaú}}$: $E = 0,563$

- Valores de $E_{\text{Mundaú}}$ obtidos a partir de médias de valores experimentais de laboratório:

A partir do Modelo da válvula de Peruca: $E_{\text{Mundaú}} = 0,592$

A partir do Modelo de Summit Control: $E_{\text{Mundaú}} = 0,585$

Valores obtidos a partir da Teoria do Potencial: $E_{\text{Mundaú}} = 0,593$

(A partir da média de valores teóricos desde $s/D = 0$ até $s/D = 0,4$)

Este confronto nos levou a adotar o valor de $E = 0,563$, média de 2 valores experimentais de campo, como a melhor estimativa para o coeficiente da válvula do Açude Mundaú. Este valor se localiza também próximo ao patamar de Gebers, com $E = 0,555$.

5.5.6 - Cálculo das vazões a partir do coeficiente E adotado

<i>Abertura</i>	<i>Q medido</i>	<i>Q calculado</i>	<i>%</i>
20 %	0,8524	0,7388	- 13
50 %	1,7621	1,4675	- 17
70%	1,8762	1,9125	+ 2
90%	2,2531	2,2137	- 2

Tabela 5.15
Vazões Calculadas

5.5.7 – Curvas de Descarga

Com base no coeficiente $E = 0,563$, pôde-se calcular os valores de coeficiente prático e determinar as curvas de descarga, que podem ser utilizadas pelos operadores.

O gráfico com as curvas de descarga, com aberturas s/D de 0,1 a 0,4, é apresentado na Figura 5.5.

Curvas de Descarga do Açude Mundaú

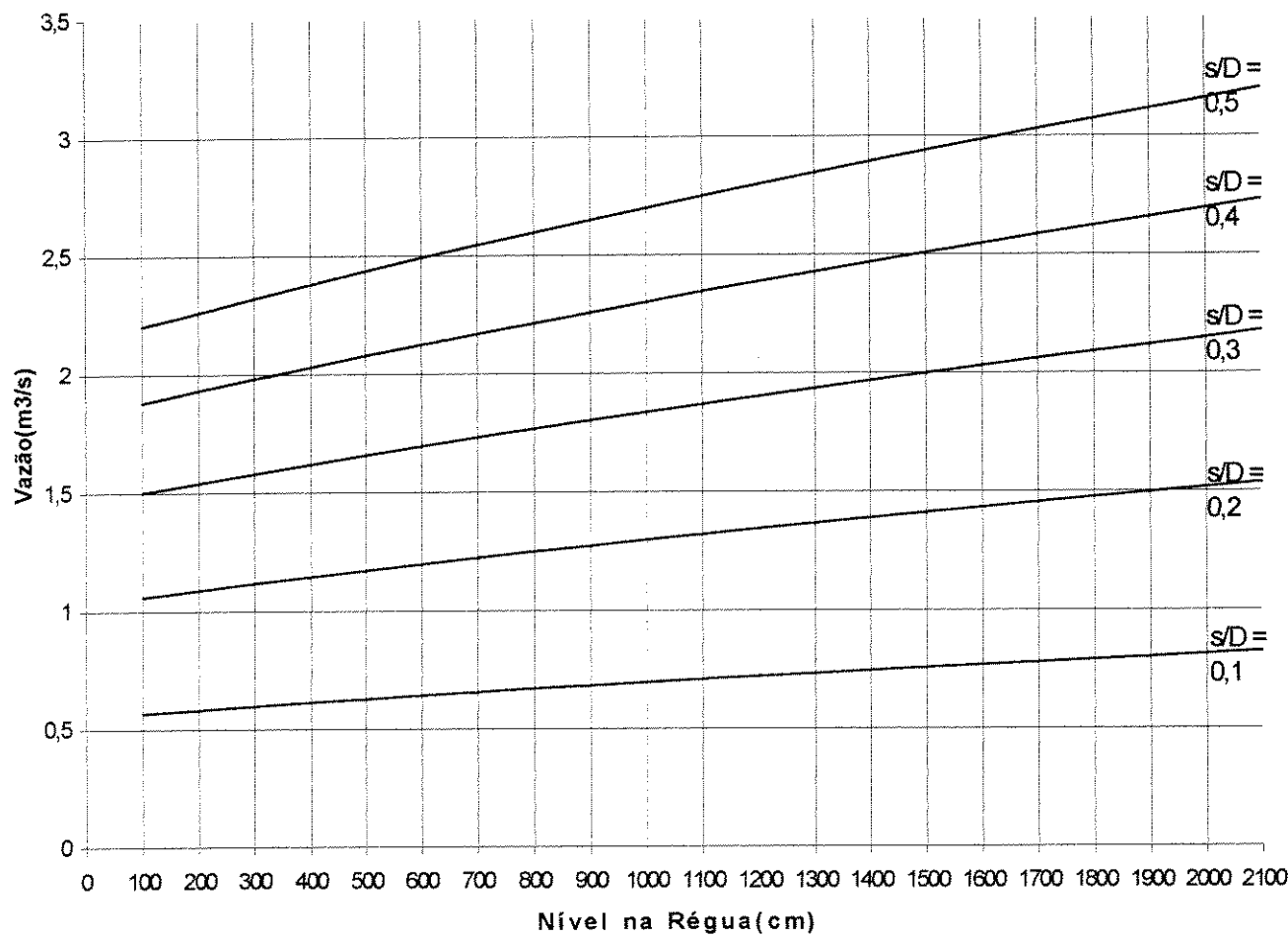


Figura 5.5
Curvas de Descarga Propostas para o Açude Mundaú

Capítulo VI

Conclusões

6.1 – Quanto ao Efeito de Escala

As fórmulas de efeito de escala devem considerar o tipo do sistema ao qual a válvula dispersora cônica está instalada, que podem ser :

- Sistema com válvula descarregando ao ar livre.
- Sistema com válvula descarregando em ambientes confinados, denominados de câmaras ou de defletores.
- Sistema com válvula afogada.

Das fórmulas de efeito de escala associadas a estes tipos de instalação, a correspondente à válvula que descarrega em câmara ou com defletor já havia sido proposta anteriormente em outros estudos.

Neste trabalho está se apresentando uma expressão mais simples para substituir com vantagem esta anterior. A nova fórmula que permite calcular diretamente o coeficiente E tem por expressão:

$$E = - 1,2695 + 0,2694 \log \Re \quad [\text{AX}]$$

Com base nos novos dados que resultaram dos ensaios da válvula do Açude Mundaú, nos dados publicados referentes aos ensaios dos modelos de Summit Control e Peruca, além daqueles obtidos no Laboratório de Hidráulica da Fec pôde-se agora propor também uma outra fórmula para o caso da válvula que descarrega ao ar livre.

$$E = - 1,3305 + 0,2694 \log \Re \quad [\text{AY}]$$

Estas duas expressões relativas ao efeito de escala estão representadas no gráfico da Figura 6.1.

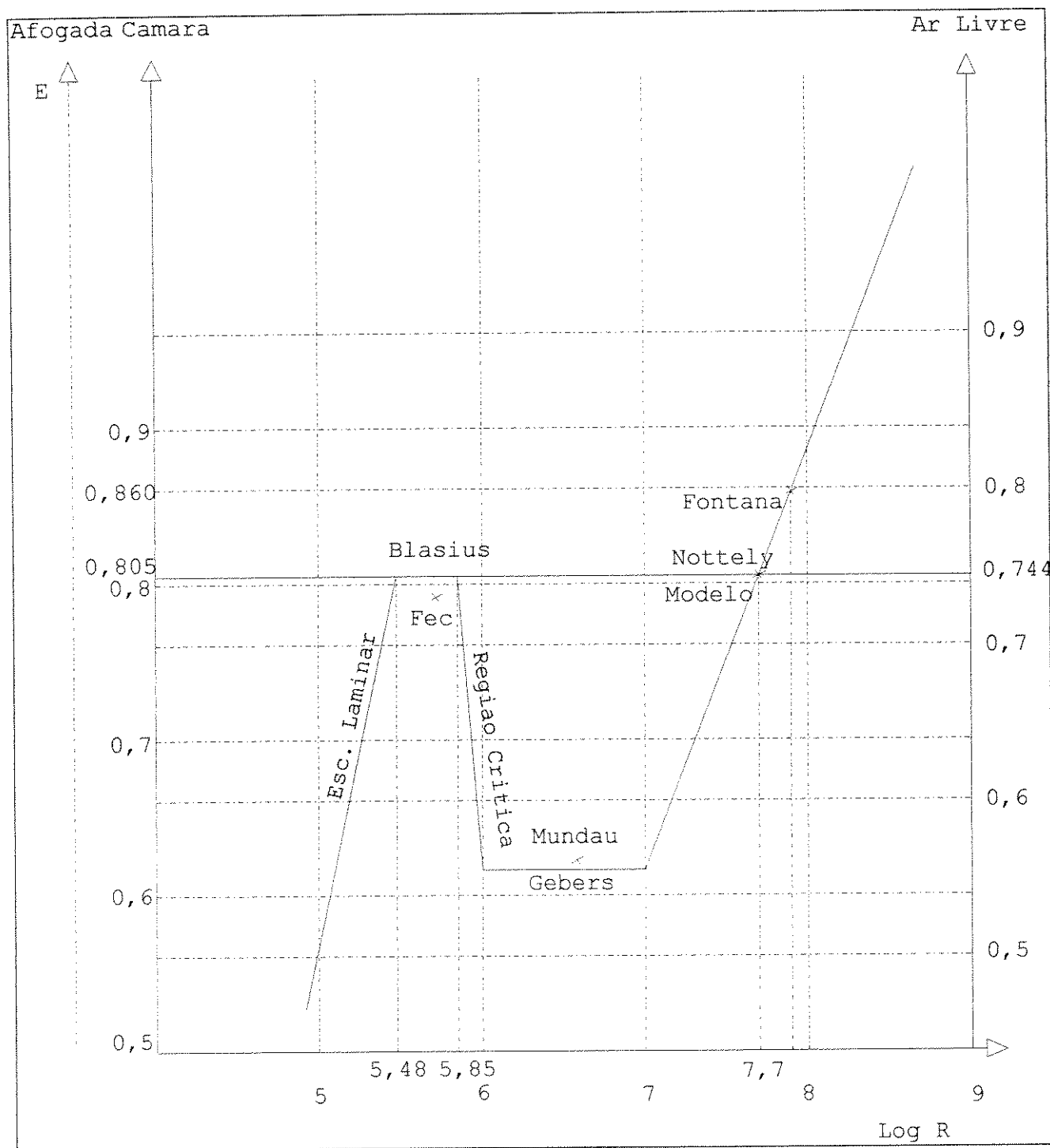


Figura 6.1
Localização dos Coeficientes $E_{\text{Mundaú}}$ e E_{Fec}

6.2 – Quanto à Utilização da Válvula como Dispositivo de Medição de Vazão

No caso das válvulas que descarregam ao ar livre, o valor do coeficiente de vazão pode ser considerado como o valor teórico obtido a partir da teoria do potencial, corrigido por um fator obtido a partir de uma função conhecida do número de Reynolds $C_f = f(Re)$. Neste tipo de instalação, a depressão ocasionada pelo jato defluente é desprezível.

No caso das válvulas que descarregam em ambiente confinado, onde se observa uma depressão considerável em decorrência do arraste de ar, o número de Euler deve merecer uma outra correção relativa a este fenômeno. O fenômeno de arraste de ar, por ser muito complexo, ainda não está equacionado adequadamente. A fórmula de efeito de escala determinada em estudos anteriores não considerou este fenômeno. O arraste de ar observado nas câmaras desqualifica então a válvula dispersora cônica como um medidor de vazão.

Para o caso da válvula afogada ainda não se dispõe de dados suficientes para a determinação de uma expressão analítica para o efeito de escala.

Em decorrência dos fatos acima apontados, pode-se concluir que a válvula dispersora cônica, quando descarregando ao ar livre, dispõe de condições para ser utilizada como um dispositivo de medição, pois a sua curva de vazões pode ser determinada a partir de coeficientes cuja precisão é comparável à oferecida pelo orifício circular.

6.3 – Com Relação às Válvulas Instaladas nos Açudes do Nordeste

Geralmente as válvulas instaladas nos açudes do Nordeste descarregam ao ar livre e podem ser classificadas como de pequeno e médio porte. Os números de Reynolds correspondentes a essas válvulas estão compreendidos dentro de um intervalo cujos extremos são aproximadamente $\Re=1.000.000$ e $\Re=20.000.000$.

Nestas condições elas podem ser consideradas como medidores de vazão quando operando em aberturas s/D menores que um determinado valor, por exemplo $s/D = 0,4$. Para aberturas superiores, a válvula fica sujeita a fenômenos de vibração que podem influenciar a precisão do coeficiente de vazão.

Assim, no caso das válvulas do nordeste, a determinação dos coeficientes de vazão práticos devem obedecer à fórmula:

$$\psi = E/k \quad [AZ]$$

Sendo que para números de Reynolds maiores que 10.000.000, o número de Euler deverá ser calculado pela expressão:

$$E = - 1,3305 + 0,2694 \log \Re \quad [BA]$$

O número de Reynolds deve ser calculado a partir da expressão:

$$\Re = \frac{E\sqrt{2gHD}}{v} \quad [BB]$$

Para número de Reynolds entre 1.000.000 e 10.000.000, o número de Euler E corresponde a valores de C_f situados dentro do patamar de pontos de Gebers. Sendo assim, o valor de E permanece constante e igual a:

$$E = 0,555 \quad [BC]$$

Cabe lembrar que o coeficiente E também permanece constante no patamar de pontos de Blasius, que corresponde a valores de números Reynolds entre 300.000 e 700.000. Neste intervalo, que normalmente corresponde a ensaios em laboratórios com modelos descarregando ao ar livre, o valor de E é igual a:

$$E = 0,744 \quad [BD]$$

6.4 – Conclusões Finais

A fórmula de efeito de escala proposta neste trabalho para calcular o coeficiente E , no caso de descarga ao ar livre, está baseada nos resultados de ensaios de apenas uma válvula protótipo, a válvula do açude Mundaú.

Faz-se necessário ensaiar pelo menos mais uma outra válvula protótipo, cujo número de Reynolds corresponda ao patamar de Gebers, para que se possa estimar o erro provável inerente ao cálculo do coeficiente de vazão.

Com isso, pode-se concluir que foi alcançado o objetivo principal deste trabalho e também recomenda-se futuramente, para a obtenção de maior precisão nos coeficientes de vazão o estudo de válvulas protótipos em outras condições, assim como o aprofundamento do estudo do arraste de ar, tanto em válvulas localizadas em câmaras como às localizadas ao ar livre.

Bibliografia

- Angelaccio, C. M.; Fattor, C. A.; Bacchiega, J. D.; Barrionuevo, H. D. - Optimizacion del Anillo Deflector de las Valvulas de Cono Fijo de la Central Nihuil IV - Buenos Aires, Instituto Nacional de Ciencia y Tecnica Hidricas, 1997.
- Batchelor, G. R. – Fluid Dynamics – Cambridge, Cambridge University, 1980.
- Blevins, Robert D. – Applied Fluid Dynamics Handbook – New York, Van Nostrand, 1984.
- Bonilha, J. R. - Curvas Características de Descarga das Válvulas Dispersoras do Tipo Howell-Bunger. - Manaus, 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Promon Engenharia S.A., 1979.
- Bonilha, J. R. - O Coeficiente de Vazão das Válvulas Dispersoras Cônicas - São Paulo, Centro Tecnológico de Hidráulica, EPUSP/DAEE, 1972.
- Burgi, P. H. - Hydraulic Model Studies of Vertical Stilling Wells. - Denver - Engineering and Research Center - Bureau of Reclamation, 1973. rec-erc-73-3.
- Centro Tecnológico de Hidráulica de São Paulo (C.T.H.) - Determinação das Vazões no Descarregador de Fundo da Barragem de Fonte Nova - São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1975.
- Cheremisinoff, Nicholas P. – Fluid Flow – Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1981.

- Chow, Ven Te - A compendium of water-resources technology - Handbook of Applied Hydrology; McGraw-Hill Book Company.
- Corps of Engineers - Hydraulic Design Criteria - Volume 2.
- Degrémont – Memento Technique de L'eau Huitième Édition – Paris, 1978.
- Delmée, Gerard J. - Manual de Medição de Vazão. - São Paulo, Blücher, 1983.
- Elder, Rex A.; Dougherty, Gale B. - Characteristics of Fixed-Dispersion Cone Valves - American Society of Civil Engineers, Papers, 1952.
- Fagerburg, T. - Prototype Hood Modification for fixed-cone valves - Rotterdam, Albertson & Kia (eds), 1989.
- Grčić, Josip – Upotreba Zatvaraca Tipa Howell-Bunger za Temeljne Ispuste i Njegovo Modelsko Istraživanje. – Zagreb, Kačićeva.
- IBGE - Anuário Estatístico do Brasil - Rio de Janeiro, 1977.
- Lancastre, Armando. - Manual de Hidráulica Geral. - São Paulo, Blücher, 1972.
- Levin, L. - Formulaire des Conduites Forcées Oléoducs et Conduits D'aération - Paris, Dunod, 1983.
- Lyons, Jerry L. – Lyons' Valve Designer's Handbook – New York, Van Nostrand, 1982.
- McNown, John S.; Yih, Chia-Shun - Free-Streamline Analyses of Transition Flow and Jet Deflection - Iowa, Iowa Institute of Hydraulic Research; supported by the Graduate College State University of Iowa and the Office of Naval Research; University Iowa City, 1953.

- Munson, Bruce R.; Young, Donald F.; Okiishi, Theodore H. - Fundamentals of Fluid Mechanics. - New York, John Wiley & Sons.
- Neilson, F. M. - Howell-Bunger Valve Vibration Summersville Dam Prototype Tests - Huntington, 1971.
- Nekrasov, B. - Hydraulics for Aeronautical Engineers - Moscow, Peace Publishers, Translated from the Russian by Talmy, V.
- Pimenta, José Lúcio F. - Comparação dos Processos de Medição de Descarga Líquida - A Água em Revista, CPRM, Ano IV, nº 7, maio, 1996.
- Pinto, L. C. S.; Sugimoto, N. H. - Análise do Comportamento Hidráulico de um Sistema de Transmissão em Escoamento Forçado e Válvulas Dispersoras - CTH - DAEE - EPUSP.
- Rebouças, A. C. ; Marinho, M. E. - Hidrologia das Secas no Nordeste do Brasil - Recife, SUDENE, 1972.
- Rouse, Hunter. - Advanced Mechanics of Fluids. - 3a. ed. - New York, John Wiley & Sons, 1965.
- Rouse, Hunter. - Elementary Mechanics of Fluids. - New York, John Wiley & Sons, 1946.
- Sermec S. A. – Manual de Operação e Manutenção da Grade, Comporta, Viga Pescadora e Comporta Howell Bunger do Açude Público Mundaú – São Paulo, Sermec.
- Streeter, Victor Lyle. - Mecânica dos Fluidos. - São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1977.
- Tamada, Kikuo; Brighetti, Giorgio; Pimenta, Carlito F. - Estudo em Modelo da Válvula Dispersora e da Bacia de Dissipação da Barragem da Usina Paraibuna - São Paulo, C.T.H. , 1974.

- Tennessee Valey Authority, Division of Water Control Planning – Progress Report on Aeration Efficiency of Howell-Bunger Valves – Norris, Report 0-6728, 1968.
- Tucci, C. E. M. - Hidrologia: ciência e aplicação - Porto Alegre, Ed. da Universidade, ABRH, EDUSP. Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v.4, 1993.

Bibliografia Suplementar

Pesquisa à World Wide Web

- American Industrial Valve
<http://mginfo.com/mgf/american/valve.htm>
- Associação Brasileira de recursos Hídricos
<http://www.abrh.org>
- Centre de Recherche en Calcul Appliqué
<http://www.cerca.umontreal.ca>
- Com-Tek
<http://www.contekvalves.com>
- École Polytechnique Fédérale de Lausanne
<http://imhefwww.epfl.ch>
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
<http://www.funceme.br>
- MCE Engineering
<http://www.mceng.com/ProjEBMUD.html>
- Moscow State University of Civil Engineering
<http://www.free.net/IM/1995/mgsu/depts/f2.en.html>
- National Technical University of Athens
<http://www.fluid.mech.ntua.gr>
- Proyecto Hidroeléctrico Toro
<http://newton.dgct.ice.go.cr/ice/toro.html>

- The University of Nottingham Library
<http://www.library.nottingham.ac.uk>
- Tohoku University
<http://www.ifs.tohoku.ac.jp>
- University of California
<http://roger.ucsd/search>
- University of Texas
<http://diana.ae.utexas.edu>
- Von Karman Institute
<http://www.vki.ac.be>