

**ANTONIO LUÍS DE CAMPOS MARIANI**

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE  
MEDIDORES DE VAZÃO TUBO MULTÍFURO**

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

São Paulo  
1995

**ANTONIO LUÍS DE CAMPOS MARIANI**  
Engenheiro Mecânico, Bacharel e Licenciado em Física, USP

**DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL DE  
MEDIDORES DE VAZÃO TUBO MULTÍFURO**

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

**Área de Concentração:**  
**Engenharia Mecânica**

**Orientador:**  
**Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta**

São Paulo  
1995

**À DEUS,  
que é Pai amoroso,  
e na sua infinita graça  
permitiu tudo e todos.**

**Aos meus pais,  
à minha sempre companheira, Ceci  
e à nossa alegria permanente, Samuel.**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. Marcos de Mattos Pimenta, pela orientação segura, pelo incentivo e por seu exemplo de serenidade e competência.

Aos professores Doutores, Tufi M. Assy, Silvio de Oliveira Jr., Euríale Zerbine e José Maria Jabardo, e todos os colegas da Mecânica dos Fluidos que me acompanharam nos discernimentos de minha vida profissional.

Aos professores do Departamento de Eng. Mecânica que colaboraram direta e indiretamente para o desenvolvimento deste trabalho. Em particular aos colegas desde o início da pós-graduação Alberto, Arlindo, Ernani e Fiorelli, fotógrafo dos protótipos, com quem dividi e multipliquei esforços e amizade.

Aos técnicos e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica, especialmente aos Srs. Donato, Joaquim, e João Dantas, pela colaboração nos processos de fabricação e montagem.

Aos estagiários que trabalharam no projeto e implantação do módulo experimental, Johnny, Luiz Fabiano, Maurício e Samy. Pelos dias em que experimentamos a virtude da paciência, em atividades de limpeza, de usinagem, de desenhos em Autocad e de programação em Pascal, coisas que aprendi quase "sem querer".

Aos meus alunos, que me ensinaram que ser professor é estar junto trabalhando o conhecimento. Particularmente aqueles que acompanhei em trabalhos na graduação, nem sempre ortodoxos, José Augusto, Marcos, Guilhoti, Sintoni, Roberto, Maurício, Sérgio, Ji, Meiji, Irene, Paulo,... sempre incentivadores de minhas atividades na EPUSP.

Ao Eng. Delmée por nossas frutificantes conversas, apoio no projeto e materiais para fabricação dos protótipos.

Aos amigos do IPT, especialmente do Laboratório de Vazão, pelo constante e competente apoio e colaboração, particularmente nas aferições de instrumentação.

À FCTH e ao Prof. Dr. Jayme Ortiz, pelo apoio e financiamento da bolsa de iniciação científica no projeto de Modernização dos Laboratórios de Mecânica dos Fluidos.

À comunidade CVX e a todos os verdadeiros amigos que sempre animaram e acreditaram no meu trabalho.



## SUMÁRIO

Lista de símbolos

Lista de tabelas

Lista de figuras

Resumo

*Abstract*

### PREFÁCIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. O campo da medição de vazão .....	1
1.2. Classificação de medidores de vazão .....	2
1.3. O medidor tubo multífuro .....	2
1.4. Análise comparativa entre o multífuro e outros medidores deprimogênios.....	5
1.5. Principais aplicações do medidor .....	7
1.6. Objetivos da pesquisa .....	9
<b>2. A EVOLUÇÃO DO MEDIDOR TUBO MULTÍFURO.....</b>	<b>11</b>
2.1. A origem do medidor: o tubo de Pitot .....	11
2.1.1. Os primeiros modelos de sondas tipo Pitot.....	11
2.1.2. Avaliação da pressão estática.....	12
2.1.3. Novas propostas .....	13
2.2. Modificações e adaptações que propõe o Pitot cilíndrico..	15
2.3. O tubo multífuro.....	18

<b>3.</b>	<b>EQUACIONAMENTO, ANÁLISE DE MODELOS E DE MEDIDORES TESTADOS.....</b>	<b>21</b>
3.1.	Equações e coeficientes empregados.....	21
3.1.1.	Equacionamento para medidores tipo Pitot.....	21
3.1.2.	Equacionamento para medidores deprimogênios.....	26
3.1.3.	Correções para a equação teórica.....	27
3.1.4.	Formulação e coeficientes adotados para os multífuros..	29
3.2.	Modelos e testes de multífuros.....	29
3.2.1.	Investigação de fatores de Influência.....	29
3.2.2.	Técnica para avaliação de valores médios.....	34
3.2.3.	Análise comparativa de geometrias através de resultados experimentais.....	38
<b>4.</b>	<b>PROJETO E FABRICAÇÃO DE PROTÓTIPOS .....</b>	<b>45</b>
4.1.	Levantamento das características construtivas.....	45
4.2.	Definição das características construtivas dos protótipos.....	46
4.2.1.	Parâmetros fixos.....	46
4.2.2.	Parâmetros não fixos.....	48
4.3.	Protótipos fabricados.....	50
4.4.	Processo de fabricação.....	59
<b>5.</b>	<b>PROJETO, FABRICAÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO MÓDULO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>65</b>
5.1.	Características gerais do projeto.....	65
5.2.	Projeto, fabricação e seleção de equipamentos.....	66
5.2.1.	Linhas de fluidos e seus acessórios.....	67
5.2.2.	Controle de vazão.....	74
5.2.3.	Conjunto motor-ventilador.....	74
5.2.4.	Instrumentação.....	76

5.2.5. Sistema de aquisição de dados.....	78
5.3 Operacionalização e calibração do módulo experimental.....	79
5.3.1. Calibração dos instrumentos.....	79
5.3.2. Ensaio de verificação.....	81
<b>6. ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS .....</b>	<b>84</b>
6.1. Metodologia.....	84
6.2. Arranjo experimental e equipamentos utilizados.....	85
6.3. Procedimento experimental .....	90
6.4. Procedimentos para o tratamento dos dados .....	93
6.5. Principais equações utilizadas para os cálculos dos resultados ...	94
<b>7. RESULTADOS .....</b>	<b>96</b>
7.1. Coeficiente de vazão em função de Reynolds.....	96
7.2. Determinação de intervalos de variação para valores médios de K .....	144
7.3. Avaliação da vazão em seção com perfil de velocidades assimétrico .....	145
7.4. Estimativa de perda de carga para os protótipos .....	146
7.5. Comparação do diferencial de pressão entre multífuros e Pitot .....	146
<b>8. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES.....</b>	<b>148</b>
8.1. Análise dos resultados avaliando influências de características construtivas.....	148
8.2. Comparação entre os desempenhos dos medidores .....	149
8.3. Conclusões.....	152
8.4. Comentários Finais.....	154
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>156</b>

## **ANEXOS**

- Anexo A - Desenhos de fabricação de peças para fixação do  
multífuros..... A.1
- Anexo B - Dados de calibração da instrumentação utilizada ..... B.1
- Anexo C - Avaliação do perfil de velocidades na seção de testes  
em várias situações..... C.1
- Anexo D - Equações para o cálculo de incertezas..... D.1
- Anexo E - Determinação dos valores médios para o coeficiente  
de vazão e respectivos intervalos de variação ..... E.1
- Anexo F - Medição de vazão com perfil de velocidades  
assimétrico. .... F.1

## **APÊNDICE**

- Apêndice I - Programas de computador desenvolvidos..... I.1

**LISTA DE SÍMBOLOS**

- $C_a$**  - coeficiente de arrasto
- $C_c$**  - coeficiente de correção
- $C_d$**  - coeficiente de descarga
- $C_i$**  - coeficiente de correção
- $C_p$**  - coeficiente de pressão
- $d$**  - diâmetro
- $D$**  - diâmetro da tubulação
- $DP$**  - pressão diferencial
- $E$**  - coeficiente de velocidade
- $F_a$**  - força de arrasto
- $g$**  - aceleração da gravidade
- $H$**  - carga
- $h$**  - diferença de alturas indicada por um manômetro
- $i$**  - índice
- $K$**  - coeficiente de vazão
- $M$**  - vazão em massa
- $n$**  - expoente que caracteriza o perfil de velocidades
- $\vec{n}$**  - versor normal
- $p$**  - pressão
- $Q$**  - vazão em volume
- $r$**  - raio ou coordenada radial
- $R$**  - número de Reynolds
- $r_t$**  - raio total da tubulação
- $S$**  - área (de uma seção transversal)
- $S_c$**  - área projetada pelo medidor
- $t$**  - tempo

**T** - temperatura

**v** - velocidade local

**V** - velocidade média

**V<sub>max</sub>** - velocidade máxima

**V** - volume

**W<sub>a</sub>** - potência das forças de atrito

**w<sub>i</sub>** - fator de ponderação

**Y** - coeficiente de compressibilidade

**y** - coordenada cartesiana medida a partir de referência

**z** - cota média em relação a uma referência

**β** - relação de áreas

**γ** - peso específico

**ε** - coeficiente de compressibilidade para fluido (placa de orifício)

**θ** - ângulo

**μ** - viscosidade dinâmica

**ρ** - massa específica

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de localização de pontos de medição e pesos para avaliação de valores médios. ....	21
Tabela 2 - Parâmetros fixos para projeto dos protótipos. ....	46
Tabela 3 - Discriminação das características dos protótipos.....	51
Tabela 4 - Dimensionamento das placas de orifício. Medidas em milímetros.....	78
Tabela 5 - Incertezas sistemáticas e faixa de operação da instrumentação.....	89
Tabela 6 - Definição das condições dos ensaios para os multífuros.....	90
Tabela 7 - Resultados dos ensaios - protótipo 1A.....	97
Tabela 8 - Resultados dos ensaios - protótipo 1B.....	98
Tabela 9 - Resultados dos ensaios - protótipo 2A.....	99
Tabela 10 - Resultados dos ensaios - protótipo 2B.....	100
Tabela 11- Resultados dos ensaios - protótipo 2C.....	101
Tabela 12 - Resultados dos ensaios - protótipo 2D.....	102
Tabela 13 - Resultados dos ensaios - protótipo 2E.....	103
Tabela 14 - Resultados dos ensaios - protótipo 3A.....	104
Tabela 15 - Resultados dos ensaios - protótipo 3B.....	105
Tabela 16 - Resultados dos ensaios - protótipo 3C.....	106
Tabela 17 - Resultados dos ensaios - protótipo 4A.....	107
Tabela 18 - Resultados dos ensaios - protótipo 4B (med. 06124).....	108
Tabela 19 - Resultados dos ensaios - protótipo 4B (med.13124).....	109
Tabela 20 - Resultados dos ensaios - protótipo 4B (med. 05015).....	110
Tabela 21 - Resultados dos ensaios - medidor ANR 75.....	111
Tabela 22 - Equações de ajuste para o Coeficiente de Vazão (K) em função de Reynolds (R). Faixa: $3 \times 10^4 < R < 3 \times 10^5$ .....	112



Tabela 23 - Equações de ajuste para o Coeficiente de Vazão ( <b>K</b> ) em função de Reynolds ( <b>R</b> ). Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ .....	113
Tabela 24 - Intervalo de variação para o coeficiente de vazão ( <b>K</b> ) em relação ao seu valor médio para vários intervalos do número de Reynolds ( <b>R</b> ). .....	144
Tabela 25 - Média das diferenças entre os valores de vazão medidos com o multífuros e com a placa de orifício para perfil de velocidades assimétrico. ( $85.000 < R < 300.000$ ).....	145
Tabela 26 - Estimativa da perda de carga para os protótipos multífuros comparada a valores para a placa de orifício. Estimativa em valores de pressão.....	146

#### **TABELAS DOS ANEXOS:**

Tabela B1 - Dados dos ensaios para calibração de termopares .....	B.1
Tabela B2 - Resultados da calibração dos termopares .....	B.2
Tabela B3 - Resultados da calibração dos transdutores de pressão .....	B.3
Tabela B4 - Avaliação dimensional da placa de orifício .....	B.4
Tabela E1 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 1A.....	E.1
Tabela E2 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 1B.....	E.2
Tabela E3 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 2A.....	E.3
Tabela E4 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 2B.....	E.4
Tabela E5 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 2C.....	E.5
Tabela E6 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 2D.....	E.6
Tabela E7 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 2E.....	E.7
Tabela E8 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 3A.....	E.8
Tabela E9 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 3B.....	E.9
Tabela E10 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 3C... ..	E.10
Tabela E11 - Valor médio para <b>K</b> e intervalos de variação - protótipo 4A... ..	E.11

Tabela E12 - Valor médio para K e intervalos de variação - protótipo 4B (med. 06124) .....	E.12
Tabela E13 - Valor médio para K e intervalos de variação - protótipo 1A (med. 13124) .....	E.13
Tabela E14 - Valor médio para K e intervalos de variação - protótipo 1A (med. 05015) .....	E.14
Tabela E15 - Valor médio para K e intervalos de variação - medidor ANR 75 .....	E.15
Tabela F1 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - protótipo 1A .....	F.1
Tabela F2 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - protótipo 1B .....	F.2
Tabela F3 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - protótipo 2E .....	F.3
Tabela F4 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - protótipo 3B .....	F.4
Tabela F5 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - protótipo 4A .....	F.5
Tabela F6 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - protótipo 4B .....	F.6
Tabela F7 - Medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico - medidor Annubar ANR 75 .....	F.7

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tubo múltifuro. ....	3
Figura 2 - Comparação entre o escoamento em torno do múltifuro e da placa de orifício.....	5
Figura 3 - Medidor de vazão tipo coifa.....	9
Figura 4 - Alguns modelos para Tubos de Pitot.....	14
Figura 5 - Geometrias típicas para tubos de Pitot. ....	15
Figura 6 - Tubo de Pitot Cilíndrico. ....	16
Figura 7 - Tubo múltifuro apresentado por PLACHE.....	18
Figura 8 - Medição de velocidade com tubo de Pitot padrão.....	22
Figura 9 - Esquema para múltifuros.....	30
Figura 10 - Coeficiente de arrasto em função do Número de Reynolds para escoamento em torno de cilindros de várias dimensões. ....	33
Figura 11 - Modelos de sensores testados.....	39
Figuras 12 -Resultados para a sonda tipo A. ....	40
Figura 13 - Resultados para a sonda tipo B. ....	41
Figura 14 -Resultados para a sonda com perfil diamante. ....	41
Figura 15 -Resultados para o sensor Annubar ensaiado em tubulação de 200 mm (8"). ....	43
Figura 16 - Resultados para o sensor Sonda 4 ensaiado em tubulação de 200 mm (8"). ....	44
Figura 17 - Resultados para avaliação da velocidade média. a) Perfis de velocidades medidos. b) Erros (%) estimados para métodos diferentes adotando-se 4 pontos de medição. ....	47
Figura 18 - Coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) em função de Reynolds (R) para corpos cilíndricos com seção transversal triangular isósceles. ....	49
Figura 19 - Desenho esquemático dos protótipos 1A e 1B.....	52

Figura 20 - Desenho esquemático dos protótipos 2A e 2B.....	53
Figura 21 - Desenho esquemático dos protótipos 2C, 2D e 2E.....	53
Figura 22 - Desenho esquemático dos protótipos 3A, 3B e 3C.....	54
Figura 23 - Desenho esquemático dos protótipos 4A e 4B.....	54
Figura 24 - Protótipo nº1.....	55
Figura 25 - Protótipo nº1. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A e B.....	55
Figura 26 - Protótipo nº2.....	56
Figura 27 - Protótipo nº2. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A, B, C, D e E.....	56
Figura 28 - Protótipo nº3.....	57
Figura 29 - Protótipo nº3. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A, B E C.....	57
Figura 30 - Protótipo nº4.....	58
Figura 31 - Protótipo nº4. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A e B.....	58
Figura 32 - Desenho de protótipo que utiliza tubos para transmissão das pressões. ....	60
Figura 33 - Desenho de protótipo que utiliza régua divisora para separar a região interna em duas câmaras. ....	61
Figura 34 - Distâncias dos trechos retos entre seções para uma linha de escoamento .....	68
Figura 35 - Distribuidor convergente para acoplamento das linhas ao ventilador.....	69
Figura 36 - Bocal de entrada. ....	71
Figura 37 - Condicionador de escoamento tipo Mitsubishi.....	72
Figura 38 - Seção de testes com peças para fixar os multífuros. ....	73
Figura 39 - Psicrômetro de aspiração.....	77

Figura 40 - Aparato experimental para calibração dos termopares.....	80
Figura 41 - Vista geral do aparato experimental.....	86
Figura 42 - Esquema do arranjo experimental.....	87
Figura 43 - Protótipo montado na seção de testes. ....	91
Figura 44 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 A.....	114
Figura 45 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 B.....	115
Figura 46 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 A.....	116
Figura 47 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 B.....	117
Figura 48 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 C. ....	118
Figura 49 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 D. ....	119
Figura 50 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 E.....	120
Figura 51 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 A.....	121
Figura 52 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 B.....	122
Figura 53 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 C. ....	123
Figura 54 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 A.....	124
Figura 55 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 06124.....	125

Figura 56 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 13124.....	126
Figura 57 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med, 05015.....	127
Figura 58 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - Annubar - ANR 75.....	128
Figura 59 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 A. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	129
Figura 60 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 B. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	130
Figura 61 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 A. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	131
Figura 62 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 B. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	132
Figura 63 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 C. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	133
Figura 64 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 D. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	134
Figura 65 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 E. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	135
Figura 66 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 A. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	136
Figura 67 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 B. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	137
Figura 68 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 C. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	138
Figura 69 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 A. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	139

Figura 70 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 06124. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	140
Figura 71 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 13124. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	141
Figura 72 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 05015. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	142
Figura 73 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - Annubar - ANR 75. (Faixa: $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ ).....	143

### **FIGURAS DOS ANEXOS**

Figura A1 - Adaptador para fixação dos múltifuros.....	A.1
Figura A2 - Anilha para fixação dos múltifuros.....	A.2
Figura A3 - Porca para fixação dos múltifuros.....	A.3
Figura C1 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q1 .....	C.1
Figura C2 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q2 .....	C.2
Figura C3 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q3 .....	C.3
Figura C4 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q4 .....	C.4
Figura C5 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q5 .....	C.5
Figura C6 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q6 .....	C.6
Figura C7 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q7 .....	C.7
Figura C8 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão Q8 .....	C.8
Figura C9 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão nº 3.....	C.9
Figura C10 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão nº 5.....	C.10
Figura C11 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão nº 6.....	C.11
Figura C12 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão nº 8.....	C.12
Figura C13 - Avaliação de perfil de velocidades simétrico - vazão nº 10....	C.13
Figura C14 - Avaliação de perfil de velocidades assimétrico - vazão nº 5..	C.14
Figura C15 - Avaliação de perfil de velocidades assimétrico - vazão nº 6..	C.15



Figura C16 - Avaliação de perfil de velocidades assimétrico - vazão nº 8.. C.16

Figura C17 - Avaliação de perfil de velocidades assimétrico - vazão nº 10..C.17

## RESUMO

Este trabalho teve por objetivo estudar os medidores de vazão tipo tubo múltifuro, analisando diferentes formas construtivas e determinando seu comportamento através da relação entre seu coeficiente de vazão (**K**) e o número de Reynolds (**R**).

Foram avaliadas formas geométricas e arranjos físicos com diferentes características para estabelecer os parâmetros adotados em protótipos do medidor fabricados para os testes. Os principais parâmetros investigados foram a geometria externa do medidor, número e posição dos furos que medem as pressões envolvidas e o arranjo físico interno do sensor, com o uso de tubos transmissores de pressão, ou de elemento divisor que estabelece duas câmaras internas. Foi, também, investigado o uso de um tubo interpolador para avaliar o valor médio das contribuições de pressão de cada orifício.

Realizados ensaios para faixa de Reynolds entre  $3 \times 10^4$  e  $3 \times 10^5$ , com quatro protótipos, desdobrados em 12 modelos diferentes, os resultados apresentaram informações para a seleção das características construtivas a ser adotadas para uma aplicação específica.

Os ensaios foram efetuados em um módulo experimental projetado e instalado para este fim, onde escoava ar em uma tubulação de 150 mm. Uma placa de orifício foi adotada como padrão.

Os pontos experimentais foram bem ajustados por funções adequadas com pequenos valores de incertezas. As curvas (**K** x **R**) obtidas para cada modelo de medidor, são analisadas e comparadas com resultados de outros autores. As informações para valores de **R** menores que  $10^5$  são uma contribuição nova desta pesquisa.

## ABSTRACT

The object of this study was a flow meter device named multiport tube or self-averaging Pitot. Using the principle proposed by the Pitot tube, the multiport is a device to measure the instantaneous flow rate in a closed conduit.

To know the performance of this device and the influence of its constructive characteristics, some parameter was analyzed. The principal parameters was: the external shape of the flow meter, the number and the positions of the holes that senses the stagnation pressure and the rear pressure, internal layout of the sensor, the uses of tubes for transmitting the pressures, or the use of a separator that creates two independent regions, one for the high pressure and the other for the low pressure.

To obtain the experimental evaluation of this parameters, prototype probes that permit different combinations and configurations has been designed and manufactured.

Tests have been made on an experimental apparatus, that operates using air in a conduit with a 150 mm diameter. An orifice plate was used as a reference.

The principal objective of these tests was to investigate the Flow Coefficient ( $K$ ) performance at the range  $3 \times 10^4 < R < 3 \times 10^5$  for Reynolds number ( $R$ ), considering the involved parameters.

Experiment results are presented and compared with other references, when it is possible (the same range of Reynolds number), and offer new information for low ranges ( $R < 10^4$ ).

The obtained information allow the possibility to develop new instruments that operate in different fields and ranges of flow rate.

## PREFÁCIO

A proposta inicial deste trabalho foi o estudo de medidores de vazão tubo multifuro. Para tanto fez-se uma retrospectiva histórica em busca de suas origens, procurando compreender sua evolução até os dias de hoje. Com este levantamento obteve-se dados sobre a configuração construtiva e sobre o comportamento de alguns modelos utilizados para fins de medição de vazão de fluidos. A partir destas informações decidiu-se pela realização de ensaios experimentais em protótipos de modo a possibilitar uma análise abrangente sobre o medidor e suas características.

Dentro desta proposta inicial, os ensaios seriam realizados no Laboratório de Medidas de Vazão do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT). Posteriormente surgiu a proposta de construção de bancada experimental no Departamento de Engenharia Mecânica, onde o mestrado estava sendo desenvolvido. Com a disponibilidade de alguns recursos destinados a ampliação e modernização dos Laboratório de Mecânica dos Fluidos, foi incentivada a efetivação desta proposta.

Assim, contando com apoio de algumas empresas privadas, que colaboraram através da doação de materiais e equipamentos, e dos Institutos de Pesquisa, IPT e Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH), foi projetada e instalada uma bancada para ensaio de medidores de vazão. Este processo de implantação exigiu uma reestruturação nos Laboratórios de Mecânica dos Fluidos, gerando capacitação técnica e de infraestrutura que resultou no **Laboratório de Instrumentação e Linhas de Fluidos**.

O espaço criado tem, atualmente, o objetivo de servir de apoio às atividades de pesquisa e ensino desenvolvidas dentro da Área de Energia e Fluidos. Em termos de ensino, ele vem completar o conjunto de laboratórios

da área, e é uma opção para ilustrar temas nas disciplinas de Linhas de Fluidos e Controle de Sistemas Termofluidos.

A consolidação do Laboratório, mantendo-o atualizado tem recebido constante atenção conforme pode ser verificado no **Projeto para implementação de recursos computacionais e de instrumentação no curso de graduação**, apresentado por HERNANDEZ NETO e MARIANI (1994), dentro do Programa de Reequipamento de Laboratórios Didáticos da Escola Politécnica da USP.

Como conseqüência deste processo ampliou-se o abrangência desta dissertação, passando a incluir o projeto, montagem, testes e avaliação metrológica do módulo experimental utilizado para os ensaios dos medidores tubo multifuro que foram analisados.

Por fim, salienta-se que nas diretrizes deste trabalho foi considerada a importância de se interagir com o meio produtivo na realização de uma pesquisa. Esta interface foi especialmente mantida através do relacionamento com o Eng. Gerard J. Delmée da empresa DIGIMAT, tradicional fabricante de instrumentação industrial e com o segmento de ventilação e ar condicionado, por meio de eventos promovidos por suas entidades representativas: Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento e Sheet Metal and Air Conditioning Contractors' National Association - Chapter Brasil.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. O campo da medição de vazão

O estudo de medidores de vazão tem assumido grande importância no decorrer das últimas décadas. Investimentos tem havido no sentido de desenvolver instrumentos com qualidade, e também, para se estabelecer normas e padrões de referência. Isto se deve à crescente preocupação em se avaliar, com exatidão, a vazão de fluidos em diferentes tipos de aplicações.

Pode-se citar alguns exemplos:

- nas indústrias onde processos exigem o controle da vazão,
- nas transações comerciais de gás natural, petróleo e seus derivados.
- em sistemas de movimentação de ar, ou gases em geral: sistemas de ventilação, de controle da poluição e de ar condicionado.

Nos exemplos citados, o conhecimento dos valores corretos de vazão traz as seguintes vantagens:

- a garantia na qualidade de um processo industrial
- a redução de erros de contabilização de volume e conseqüente prejuízos em transações comerciais
- um melhor controle em sistemas de movimentação de ar, o que proporciona maior eficiência, e resulta na redução no consumo de energia com melhoria das condições nos ambientes em que atuam.

A determinação da vazão para um fluido que escoar em um conduto pode ser realizada com o uso de instrumentos adequados e através de seis diferentes tipos de medições, conforme sintetizado por PURSLEY (1994):

- a) Medindo as velocidade em pontos de uma seção.
- b) Medindo a velocidade média em uma seção do conduto
- c) Medindo a vazão volumétrica diretamente com um medidor
- d) Medindo Volume total e o correspondente intervalo de tempo

e) Medindo vazão em massa

f) Medindo a massa total e o respectivo intervalo de tempo

O tubo multífuro, objeto deste estudo, conjuga os dois primeiros modos de medição citados.

## **1.2. Classificação de medidores de vazão**

A classificação de medidores de vazão apresentada pela norma NBR 10.396 (1988) elaborada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, que tem semelhança com a proposta da American Society of Mechanical Engineer - ASME (1971) na sua publicação *Fluid Meters*, divide os medidores de vazão em dois grandes grupos: volumétricos e de vazão instantânea.

Como subdivisão dos medidores de vazão instantânea está o grupo de medidores que opera pelo princípio da pressão diferencial, no qual se insere o medidor tipo tubo multífuro, que é tema de análise deste trabalho. Neste grupo, junto com o multífuro, estão outros medidores como a placa de orifício, o tubo de Venturi, o bocal e o tubo de Pitot. Eles podem ser chamados de medidores deprimogênicos, isto é, geradores de depressão. Esta denominação é proposta por DELMÉE (1983).

## **1.3. O medidor tubo multífuro**

O tubo multífuro é um medidor para ser empregado na determinação da vazão de fluidos que escoam através de condutos forçados. Pode-se afirmar que esse funciona como se houvessem vários tubos de Pitot associados, avaliando a velocidade em diferentes pontos da seção transversal do conduto, e obtendo uma média dessas velocidades. É também chamado de tubo de Pitot médio.



Trata-se de um tubo cilíndrico<sup>1</sup>, contendo orifícios dirigidos para montante que operam como tomadas da pressão de estagnação nas diferentes posições em que estão colocados. Possui, também, uma ou várias aberturas opostas às primeiras, dirigidas para jusante que permitem avaliar uma pressão denominada "de esteira", que tem a mesma função dos orifícios que medem pressão estática no tubo de Pitot estático conforme apresentado na figura 1 a seguir.

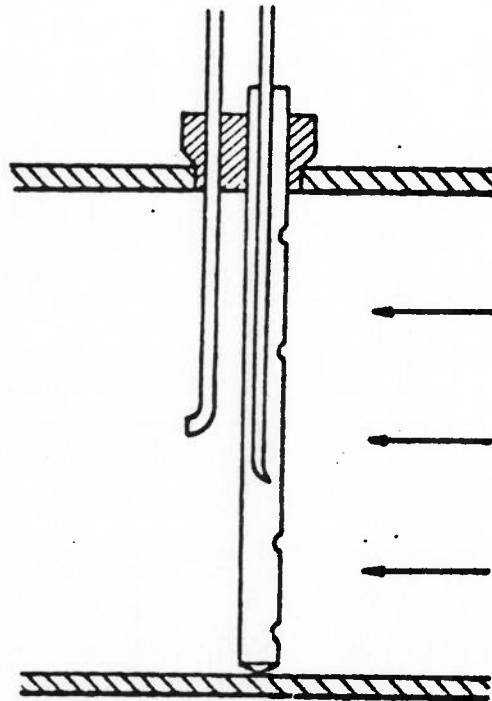


Figura 1 - Tubo multifuro (NBR 10396 (1988))

A diferença entre os valores destas pressões determina a vazão instantânea através de equacionamento similar aos outros medidores de seu grupo, onde relaciona-se a raiz quadrada da diferença de pressão (**DP**) com a velocidade média do fluido que escoar:

$$V \propto \sqrt{DP}$$

<sup>1</sup> O termo cilíndrico, neste texto e em algumas referências, é usado não só para os sólidos com seção transversal circular, mas de modo generalizado, para prismas retos com diferentes geometrias de seções transversal.

O desenvolvimento desse dispositivo ocorreu a partir da evolução dos tradicionais tubos de Pitot, com o objetivo de obter-se de maneira rápida e simples a velocidade média com que o fluido escoar no conduto, sem interferir de modo significativo no comportamento do escoamento.

Várias formas geométricas e soluções construtivas podem ser adotadas para a construção de medidores deste tipo.

A utilização deste sensor, de maneira a obter-se resultados confiáveis e com exatidão, está condicionada à adoção de coeficientes convenientes e adequados quando do cálculo da vazão. Coeficientes que permitam o cálculo da vazão real e que considerem a influência de fatores específicos, propondo correções.

Desde o fim da década de 60, este medidor vem sendo alvo de investimento da empresa norte americana Dieterich Standard Corporation, que patenteou alguns modelos com o nome Annubar. Desde esta época, pesquisas tem sido desenvolvidas pela própria empresa no sentido de melhorar o desempenho deste sensor. As informações de ensaios dos modelos americanos, conforme artigo de BRITTON; MESNARD (1982), apontam para estes um comportamento do coeficiente de vazão praticamente constante, variando +/- 1% para faixa onde o número de Reynolds está entre  $10^5$  e  $10^6$ .

No Brasil tem-se conhecimento de que existem várias versões fabricadas e instaladas em diferentes tipos de aplicações, principalmente na área industrial. Dentre os fabricantes nacionais, sabe-se que apenas um, conforme apresentado no relatório de ensaio do Centro Tecnológico de Hidráulica - C.T.H. (1984), investiu na verificação do desempenho medidor, denominado neste caso Sonda 4. Ignora-se outros testes onde medidores multítipos brasileiros tenham sido avaliados com preocupações metrológicas, indicando que parcela considerável destes instrumentos provavelmente não

possuem coeficientes adequadamente especificados para que a vazão seja determinada com exatidão.

#### 1.4. Análise comparativa entre o multífuro e outros medidores deprimogênicos

A utilização do tubo multífuros oferece vantagens quando comparado aos medidores por pressão diferencial mais usualmente empregados para escoamento em condutos, como placa de orifício, bocal, tubo de Venturi e tubo de Pitot. Algumas vantagens são apresentadas:

- a) Em função da geometria de sua seção transversal, e da área que ocupa na seção do conduto, o multífuro provoca menor perturbação no escoamento, resultando menor perda de carga (figura 2). Conseqüentemente, tem-se um custo menor para a movimentação do fluido, tornando-o elemento favorável à conservação de energia.

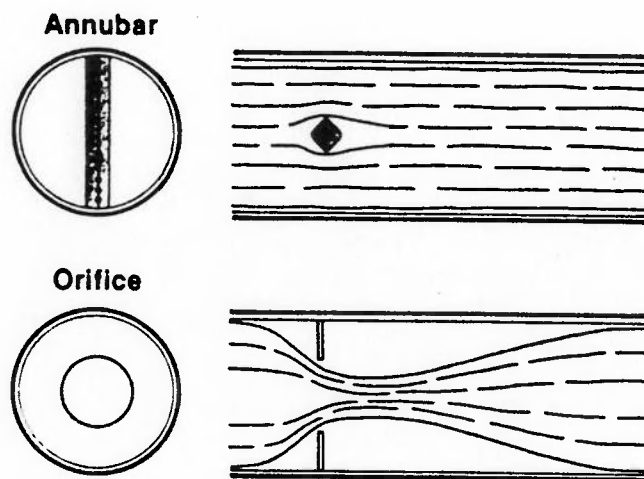


Figura 2 - Comparação entre o escoamento em torno do multífuro e da placa de orifício (DIETERICH (1976))

- b) Apresenta maior facilidade para ser instalado, pois exige, no caso mais comum, que seja feito apenas um furo onde será soldada uma conexão adaptadora através da qual o medidor é fixado. Oferece ainda, como

alternativa, a possibilidade de ser montado conjuntamente com uma válvula, o que permite a remoção do instrumento quando desejado, sem interrupção do escoamento.

- c) Maior diferencial de pressão (DP) causado pelo seu sistema de avaliação de pressão de esteira ao invés da pressão estática respectiva. Característica que ajuda na medição de escoamentos de baixas velocidades.
- d) Comparativamente ao tubo de Pitot, possui maior agilidade, rapidez e praticidade na leituras de pressão e determinação da velocidade média e da vazão.
- e) Maior segurança na substituição do tubo de Pitot em avaliações de velocidade média através de um único ponto. Técnica citada nos artigos de CHRISTIANSEN; FRENCH (1937), COLE (1935), PRESTON (1950), na norma BS 1042 (1984) e no manual da SABESP (1982).
- f) Pode ser empregado para grandes diâmetros ( $D > 500$  mm), sendo construído e adaptado com número de tomadas de pressão adequadas a cada caso.
- g) Pode ser utilizado em escoamentos de diferentes fluidos, gases ou líquidos.

Como desvantagens, o medidor tipo tubo multifuro apresenta as seguintes características:

- a) Dependência do perfil de velocidades. Mesmo que não haja necessidade de conhecer-se perfeitamente a distribuição das velocidades ao longo do diâmetro, o medidor poderá apresentar resultados com erros para situações onde as velocidades tenham comportamento muito irregular.

b) Não possui flexibilidade, como o tubo de Pitot, onde um instrumento pode operar em tubulações de diferentes diâmetros. O multífuro é construído para uma especificação determinada de tubulação, isto é com diâmetro interno bem definido.

### **1.5. Principais aplicações do medidor**

Atualmente, o emprego deste medidor está principalmente localizado na área industrial, onde é usado para diferentes tipos de fluidos. Outras aplicações, com grande potencial, como em sistemas de ventilação e ar condicionado, e em redes de abastecimento de água, são áreas onde sua utilização não está muito difundida.

Algumas informações sobre o panorama atual de emprego de medidores de vazão para escoamento em condutos, podem indicar possibilidades para ampliar-se o emprego do medidor multífuro.

Levantamentos realizados indicam que, a utilização de medidores que operam por pressão diferencial está bastante difundida e o principal medidor empregado é a placa de orifício. Conforme estatística apresentada por vários autores, na Europa, considerando-se o número de medidores de vazão instalados, 48% deles são do tipo por pressão diferencial. Outro dado trazido por HALCEY (1986) apud PEREIRA (1989) mostra uma estatística feita na Inglaterra sobre os medidores instalados, dizendo que 61% dos medidores instalados operam por diferença de pressão, sendo que a maior parte deles é do tipo placa de orifício. Nos Estados Unidos da América esta família de medidores, também é a que possui o maior número de instrumentos em uso, dominada uma vez mais pelas placas de orifício.

Analisando os dados acima, dentro de uma conjuntura onde a conservação de energia tem sido preocupação permanente, o medidor multífuro surge como alternativa interessante. Pode, por exemplo, substituir

parte das placas de orifício, utilizando o mesmo medidor de pressão usado originalmente.

Outro emprego potencial para o tubo multífuro é nas redes de abastecimento de água, onde é freqüente a utilização de tubos de Pitot para o levantamento dos parâmetros hidráulicos. Como é apresentado no manual da SABESP (1982), sugere-se que a vazão de água numa seção seja determinada a partir de uma única medida de velocidade.

Para o caso da SABESP as medições são feitas com modelos de Pitots tipo Cole, chamado no manual de Simplex. Os dados obtidos desta forma são extrapolados de modo a determinar a velocidade média e a vazão. Ainda que sejam tomados uma série de cuidados na medição, o valor obtido para a velocidade média pode ter uma incerteza associada acima de 10%. O tubo multífuro empregado nesta aplicação pode oferecer resultados com maior segurança e exatidão.

Em sistemas de ar condicionado e ventilação (A.C.V.) é possível encontrar múltiplas aplicações para os diversos tipos de multífuro. Pode ser em substituição aos anemômetros, velômetros e Pitots, tradicionalmente usados nas redes de ar, ou no lugar de medidores deprimogênicos instalados em linhas de água gelada.

Podem ser citados dois exemplos de equipamentos para A.C.V. onde já existe o emprego sensores que possuem características muito semelhantes ao tubo multífuro:

- os medidores tipo coifa (figura 3), recomendados nos manuais da ASHRAE (1989) e da SMACNA (1991) para avaliação de vazão em saídas de ar, grelhas, difusores.
- os sensores de vazão utilizados em alguns modelos de caixas de distribuição dos sistemas de ar condicionado que operam por Volume de Ar Variável (V.A.V.).

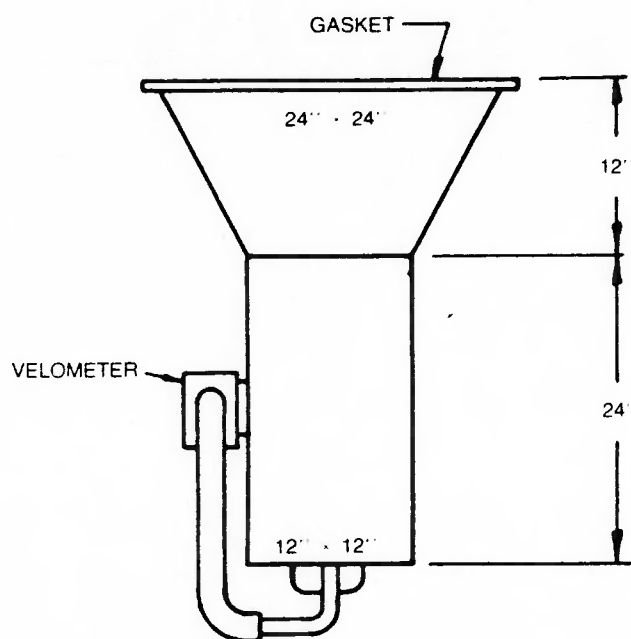


figura 3 - Medidor de vazão tipo coifa (SMACNA (1991))

### 1.6. Objetivos da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho consistiu em estudar os medidores de vazão tipo multífuros, analisando diferentes formas construtivas, determinando coeficientes adequados e apresentando curvas em termos de parâmetros adimensionais que representassem o comportamento deste medidor.

Para o desenvolvimento deste estudo foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Definição das características construtivas a serem investigadas.
- Estabelecimento de um método de análise e adoção de procedimentos experimentais.
- Obtenção de um conjunto de informações que auxiliassem a seleção de um tipo de medidor multífuro , para determinada condição de operação.

Em função desses objetivos específicos, os multífuros tiveram investigadas sua geometria externa, aspectos das tomadas de pressão e seu arranjo interno. Foram realizados ensaios de calibração adotando-se de



procedimentos baseados em normas, que compararam os protótipos a uma placa de orifício definida como padrão. Os dados experimentais foram tratados resultando em curvas, representadas nos gráficos do coeficiente de vazão ( $K$ ) em função do número de Reynolds ( $R$ ), para os diferentes protótipos.

Pode-se, ainda, enumerar algumas metas que surgiram dentro do processo de pesquisa:

- Projeto e implantação de módulo experimental para calibração de medidores de vazão.
- Estabelecimento de método para aquisição de dados experimentais via computador.
- Desenvolvimento de técnicas para fabricação de protótipos de medidores multifuros.
- Definição de procedimentos de aferição de instrumentação e de padrões de referência.

## **2. A EVOLUÇÃO DO MEDIDOR TUBO MULTÍFURO**

### **2.1. A origem do medidor multifuro : o tubo de Pitot**

Considerando as características do tubo multifuro, pode-se dizer que se trata de um medidor de vazão que surgiu a partir do desenvolvimento do tubo de Pitot. Fato este confirmado na pesquisa de sua origem. Assim, é apresentado um breve histórico sobre o tubo de Pitot com enfoque nas alternativas utilizadas para avaliar vazão em condutos.

#### **2.1.1. Os primeiros modelos de sondas tipo Pitot**

A origem histórica do tubo de Pitot, narrada por COLE (1935), acontece em 1730 quando o engenheiro francês, Henri Pitot, utilizando um tubo de vidro curvo no Rio Sena, descobriu que o peso da coluna de água rosada no seu tubo, era proporcional ao quadrado da velocidade do escoamento. Ao lado desta extrema simplicidade, este equipamento foi uma novidade na medição de velocidade sem a utilização da variável tempo.

Medidores tipo Pitot, com tubos conjugados, foram desenvolvidos 125 anos depois por outro engenheiro francês, Darcy. Ele construiu uma forma modificada com o tubo estático à jusante e outra que possuía apenas aberturas laterais. Esta última oferecia leituras de pressão estática próxima da verdadeira. Darcy reduziu a influência de vibrações através do uso de orifícios de área muito menor que a dos tubos. Este modelo foi largamente usado por outro engenheiro francês, Bazin, na mesma época.

Hiram F. Mills foi provavelmente o primeiro engenheiro americano a usar o tubo de Pitot para escoamentos em tubulações de 300 mm (12") de diâmetro, em 1875. Ele preferiu a forma simples do tubo de Pitot com a pressão estática medida utilizando piezômetros na parede da tubulação.

Vários outros engenheiros fizeram uso deste instrumento, porém, nos trabalhos do final do século XIX, o tubo de Pitot era considerado como "instrumento pouco utilizado e em geral apresentado como imperfeito para a determinação das velocidades", conforme dito, por MERRIMAN (1890) apud COLE(1935).

Em 1902, é publicado, nos *Transactions da American Society of Civil Engineers* (A.S.C.E.), de autoria de WILLIAMS et al. (1902) apud COLE (1935), um primeiro estudo específico sobre aplicação do tubo de Pitot para fazer medições em tubulações pressurizadas.

Estudos desenvolvidos por White em 1901 apresentam novo equacionamento para tubos de Pitot que utilizam único orifício para avaliar a pressão dinâmica apresentando a fórmula  $h = v^2/2g$ , mais precisa que  $h = v^2/g$  que havia sido adotada por outros autores até aquela época.

A teoria para a pressão dinâmica avaliada por um tubo tipo Pitot foi bem desenvolvida por Moody e Rogers e outros em 1914. Neste momento apresentou-se o equacionamento:

$$v = C_c \sqrt{2 g h} \quad (2.1)$$

onde  $C_c$  é o coeficiente para o tubo de Pitot e  $h$  representa a diferença de pressão em termos de altura de coluna de fluido.

### 2.1.2. Avaliação da pressão estática

O estabelecimento de uma metodologia para a avaliação da pressão estática evoluiu com maior dificuldade. Uma das possibilidades, era fazer a medição através da parede do conduto com um piezômetro, que apesar de simples, não apresentou condições seguras para a obtenção de bons resultados, conforme relatado por ALLEN; HOOPER (1932). Assim a preferência, no início deste século, permaneceu pelo tipo empregado por

Darcy e Bazin, com a tomada de pressão estática presente na sonda do tubo de Pitot.

HUBBARD (1939) investigou largamente os erros que influenciam os resultados de valores medidos com tubo de Pitot. Pesquisou sobre o comportamento da pressão estática quando há presença do suporte do tubo de Pitot. Em seu trabalho são apresentados resultados para testes realizados em tubulações onde varia-se a distância entre o ponto onde a pressão estática é medida e a posição do suporte do tubo de Pitot. Estes erros são causados pela redução da área da seção transversal ocupada pelo fluido, em função da presença do medidor de velocidade.

No caso de utilizar-se o tubo de Pitot estático para medir a pressão estática, o valor lido pode ser afetado por dois fatores: a geometria da tubo e a distância entre o plano dos orifícios e a extremidade deste tubo, segundo HUBBARD (1939).

O comportamento de orifícios localizados na parede de tubulações para avaliação de pressão estática, foi tratado mais recentemente no trabalho de DUCRUET; DYMENT (1984). Através do uso de parâmetros adimensionais, são analisados a influência de efeitos da camada limite, do gradiente de velocidades e da curvatura da parede.

Técnicas que utilizam médias de valores de pressão estática medida na parede, são avaliadas por BLAKE (1976). Em seu estudo comparativo, os resultados apresentados pelo modelo "triplo T" indicam ser esta uma alternativa que oferece valores médios muito próximos aos verdadeiros.

### **2.1.3. Novas propostas**

Foi desenvolvido por Cole em 1896, como alternativa, um medidor de dois tubos com extremidades apontadas em sentidos opostos, fabricado com a tomada de pressão estática apontado para jusante, a ser utilizado em

tubulações. Segundo COLE (1935) este modelo, comparado a outros da época, ofereceu melhores resultados, quando feitas aferições. Este modelo recebeu o nome de Pitot Cole (ou tubo pitométrico de Cole), homenagem a seu criador. Nos anos 70/80, este instrumento foi também denominado Tubo de Pitot Reverso, conforme AMCA (1990).

Para COLE (1935) e FOLSOM (1956), é no início deste século que os estudos sobre os vários modelos de tubo de Pitot são feitos através de testes de aferição em Centros de Pesquisa. Isto faz com que este instrumento evolua, passando a ter na década de 30 um bom desempenho e a ser usado com segurança nas avaliações de velocidade e vazão para escoamentos.

Em várias contribuições, como nas apresentadas por MERRIAM; SPALDING (1935) apud FOLSOM (1956), e na de HUBBARD (1939), foram realizadas avaliações com modelos de sondas com características geométricas e construtivas distintas, medindo a pressão total. Foram, também, estudados os efeitos da variação do diâmetro do orifício de pressão total, como a influência do desalinhamento da sonda. Seus resultados indicam que o problema mais crítico ocorreu devido ao desalinhamento.

Na figura 4 apresenta-se também uma série de geometrias adotadas para a tomada de pressão total que foram testadas nos vários trabalhos.

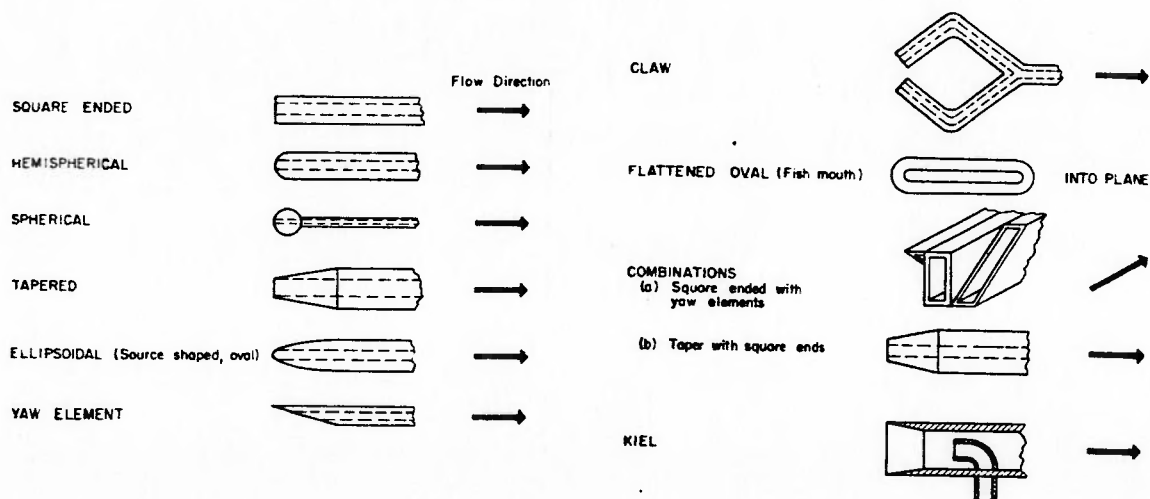


Figura 4 - Geometrias típicas para tubos de Pitot (FOLSOM (1956))

Consolidando os resultados dos trabalhos de pesquisas alguns modelos de tubos de Pitot foram desenvolvidos e testados em diferentes centros de pesquisa e são aceitos internacionalmente como tubos de Pitot padrão. Em geral, os modelos receberam o nome da instituição que o desenvolveu. Fazem parte de normas, possuindo bem caracterizadas as dimensões construtivas. Alguns exemplos estão apresentados através dos desenhos da figura 5

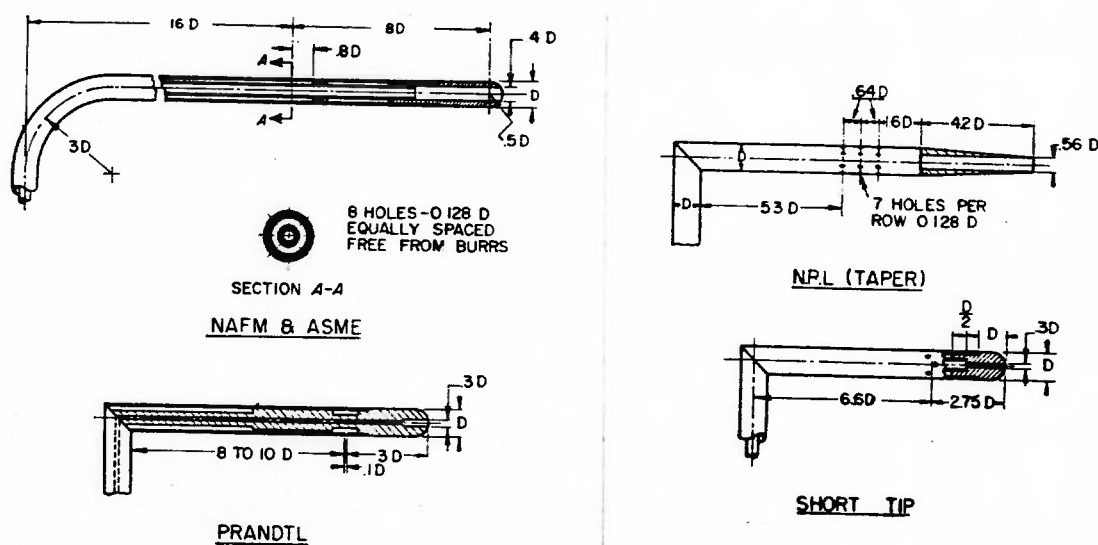


Figura 5 - Modelos para tubos de Pitot padronizados (FOLSOM (1956)).

A contínua busca de geometrias e formas que apresentassem um bom desempenho para o medidor, é a mola propulsora de diferentes pesquisas que geraram inclusive o tubo multifuro que é escopo deste trabalho.

## 2.2. Modificações e adaptações que propõe o Pitot cilíndrico

No desenvolvimento de novas formas construtivas para o tubo de Pitot, um dos conjuntos de soluções constituiu-se de sensores com corpos cilíndricos.

Segundo relato de FOLSOM (1956), dentre as propostas surgidas na década de 30, uma série de medidores tipo Pitot normalmente usado, eram construídos com tomadas de pressão adequadamente localizadas em um tubo

cilíndrico. O tubo era localizado com seu eixo perpendicular à direção do campo de escoamento. Ele poderia ser inserido no conduto através de apenas uma de suas bordas ou poderia transpassá-lo inteiramente. Suas tomadas de pressão estavam localizadas próximas à posição central da tubulação.

Alguns exemplos de medidores que seguem esta configuração, são analisados no artigo de CHRISTIANSEN; FRENCH (1937), que apresenta diferentes modelos e tamanhos para os chamados tubos de Pitot Transversal e Tubo de Collins. O primeiro é um dispositivo com um orifício, e o segundo com dois orifícios, patenteado por Collins. Ambos foram aferidos juntamente com o tubo de Pitot tradicional e com o tubo estático.

O tubo de Pitot cilíndrico, apresentado no artigo de THRASHER; BINDER (1950) é avaliado para escoamentos compressíveis. Estes autores mostram que através do estudo da distribuição de pressões em torno de um cilindro, pode-se determinar para este tubo (figura 6) o ângulo formado entre os pontos onde a pressão dinâmica é igual a zero (pontos A e C), para determinada faixa de número de Reynolds. Assim estes tubos são fabricados com orifícios localizado a uma distância entre eles de duas vezes o ângulo crítico, podendo ser utilizados para determinar o módulo e a direção da velocidade.

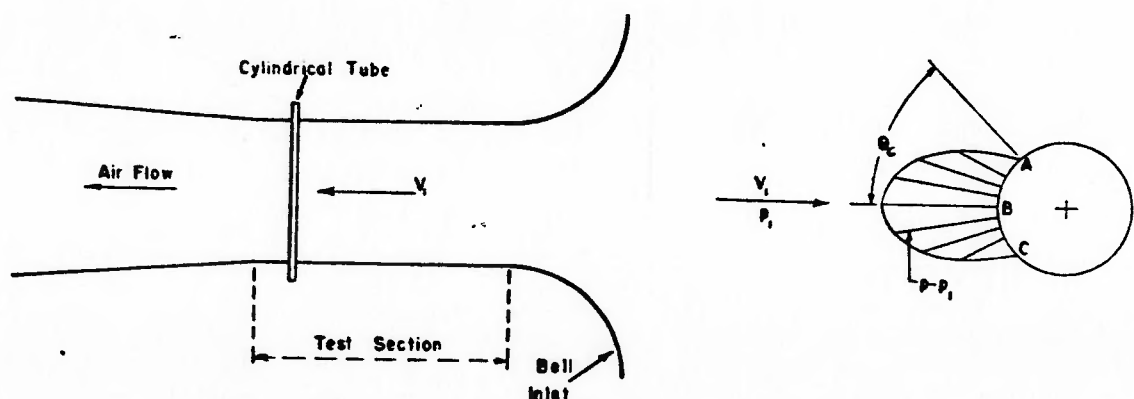


figura 6 - Tubo de Pitot Cilíndrico (THRASHER; BINDER (1950))

Também há interesse, no presente trabalho, nas observações de HENKE (1926) apud FOLSOM (1956), que mostram testes feitos usando cilindro de 25,4 mm (1") de diâmetro como sensor de pressão estática, em um jato livre entre 9,15 m/s a 53,35 m/s (30 a 175 pés/s), onde os orifícios de medição tinham diâmetros entre 0,20 mm e 6,35 mm (0,008" até 0,25"). Estes testes sugerem que os orifícios devem ter diâmetros menores que 1,52 mm (0,06") para medir com exatidão a distribuição de pressões estáticas. Surge neste artigo a observação de que quando se mede a pressão de esteira através de um orifício na parte de trás de um cilindro não é observada a influência de sua dimensão nos resultados.

Uma investigação sobre o desempenho de um tubo de Pitot transversal para avaliação de perfil de velocidades em escoamentos bifásicos é elaborado por HILLS (1983). O modelo usado é denominado Tubo de Pavlov, e trata-se de um tubo cilíndrico com quatro orifícios defasados de ângulos de 90°.

É possível distinguir-se o tubo de Pitot cilíndrico que possui tomadas de pressão próximas à extremidade, de outro denominado tubo de Pitot transversal, que é constituído de um cilindro que permanece presente ao longo de todo o diâmetro na seção de testes. Neste último, geralmente os orifícios geralmente são localizados na região central da tubulação, isto é, onde passa o eixo de simetria axial do conduto.

Outros modelos de tubos de Pitot cilíndricos com configurações semelhantes aos já citados são apresentados nos trabalhos de WINTERNITZ (1955), SILBERMAN (1947) apud FOLSOM (1956), e OWER; PANKHURST (1966).



### 2.3. O tubo Multifuro

A primeira versão do tubo multifuro, que teve sucesso como medidor de vazão, foi produzida em 1968. Fabricado a partir de um cilindro de seção transversal circular com múltiplas tomadas de pressão de estagnação distribuídas ao longo do seu eixo longitudinal, como relata PLACHE (1974).

Esta versão apresentava quatro orifícios orientados à montante e precisamente localizados de modo que cada um deles avaliasse a pressão de estagnação média correspondente a uma das quatro regiões de igual área em que foi dividida a seção transversal da tubulação. A média destas quatro contribuições de pressão era transmitida por um tubo interno ao cilindro, denominado tubo de interpolação. A pressão de esteira era medida através de um tubo independente localizado atrás do cilindro com seu orifício apontado para jusante.

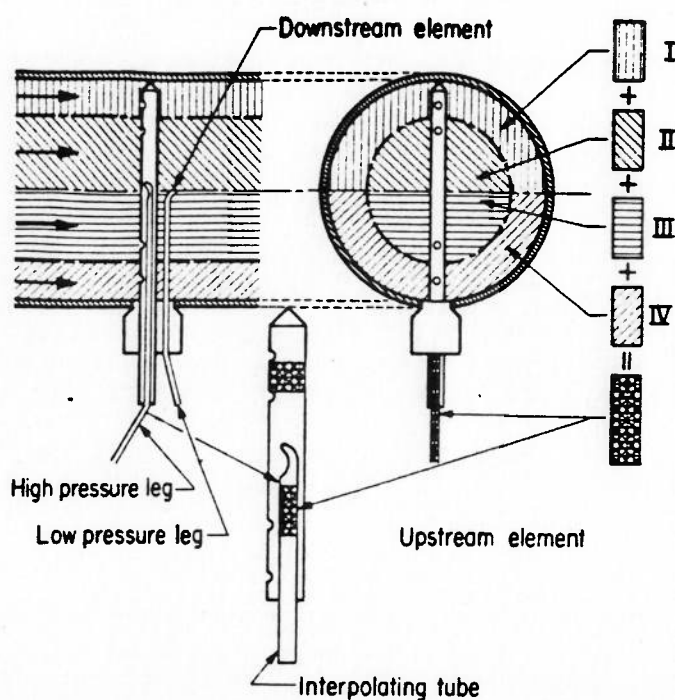


Figura 7 - Tubo multifuro apresentado por PLACHE (1974)

Segundo PLACHE (1974), este tubo interpolador, que tem a função de fazer uma média dessas contribuições de pressão, foi a chave para capacitar o tubo multífuro como um medidor de vazão primário. O autor afirma que testes realizados no Laboratório de Hidráulica e Prevenção de Incêndios do *Illinois Institute of Technology* comprovaram o bem sucedido desempenho de um modelo construído para tubulações de 150 mm (4"), *schedule 40*.

Este modelo foi patenteado pela *Dieterich Standard Corp.* com o nome de Anubar, e apresentado como instrumento para aplicação na indústria de processos.

Em seu artigo, PLACHE (1974) faz uma comparação entre o multífuro e o Pitot convencional, aplicados à medições em linhas industriais. Uma das vantagens salientadas no multífuro, está no fato dele "sentir" todas as contribuições de pressão instantaneamente, enquanto o Pitot necessita de várias medições, podendo haver flutuações na vazão durante o período de leitura. Outra qualidade avaliada, indicou que na medição com o multífuro a área da seção transversal permanece constante, e na medição com Pitot, a área varia na medida em que o instrumento é introduzido na tubulação. Comenta, também, sobre o risco de obstrução das tomadas de pressão, nos casos de fluidos que contenham partículas, afirmando que o multífuro está menos sujeito a este tipo de problema.

Novos modelos surgiram, como o apresentado pela DIETERICH (1976), onde o tubo que mede a pressão de esteira teve sua localização alterada. Este passou a estar localizado internamente ao corpo cilíndrico, com seu orifício faceado à superfície deste corpo, apontado para jusante. Configuração semelhante à alguns modelos de Pitot cilíndricos já citados, (FOLSOM (1956)).

No final da década de 70 e nos anos 80, outras configurações geométricas são testadas para o multifuro. A geometria proposta tem a seção transversal do corpo cilíndrico em forma de diamante, um octógono irregular, que em ensaios comparativos ao formato circular, apresenta bons resultados conforme BRITTON; MESNARD (1982). Estes dados estão detalhados em discussão posterior.

### **3. EQUACIONAMENTO, ANÁLISE DE MODELOS E DE MEDIDORES TESTADOS**

#### **3.1. Equações e coeficientes empregados**

Na análise do multífuro são estudados modelos que fazem duas abordagens: a primeira tratando-o como um conjunto de tubos de Pitot associados, e o segundo como um sensor que avalia a vazão através de uma diferença de pressão promovida pela interferência do instrumento na região de escoamento. Apresenta-se os equacionamentos básicos para estes dois tratamentos, que serão na seqüência do trabalho utilizados nos modelos e nos cálculos.

Foram consideradas as seguintes hipóteses no desenvolvimento dos equacionamentos:

- Escoamento plenamente desenvolvido em movimento permanente
- Fluido incompressível
- Propriedades físicas do fluido constantes

#### **3.1.1. Equacionamento para medidores tipo Pitot**

Este tipo de sensor procura medir a velocidade sem interferir nas características do escoamento onde é posicionado.

No tubo de Pitot padrão, a determinação da velocidade em uma linha de corrente é estabelecido considerando que ocorre um processo de desaceleração isoentrópico das partículas entre um ponto 1, onde deseja-se determinar a velocidade, e um ponto 2, onde localiza-se a tomada de pressão de estagnação do instrumento.

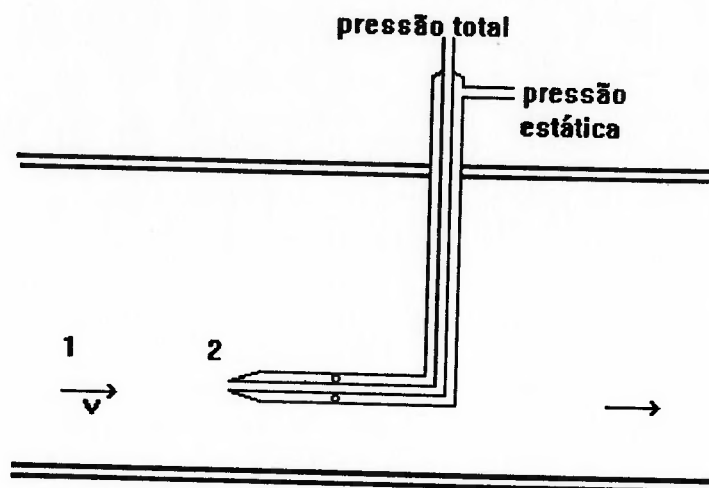


Figura 8 - Medição de velocidade com tubo de Pitot padrão

Aplicando-se a equação de Bernoulli entre os pontos 1 e 2, temos:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 \quad (3.1)$$

onde

$p_1$  é a pressão estática ( $p_{estática}$ ),

$p_2$  é a pressão de estagnação ou pressão total ( $p_{total}$ ),

e sendo  $v_2 = 0$  e admitindo  $z_1 = z_2$  a equação anterior resulta:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2(p_2 - p_1)}{\rho}} \quad \text{ou} \quad v = \sqrt{\frac{2(p_{total} - p_{estática})}{\rho}} \quad (3.2)$$

Considerando que a diferença de pressões pode ser medida com um manômetro onde o fluido manométrico tem a mesma massa específica do fluido que escoar, temos:

$$(p_{total} - p_{estática}) = \rho \cdot g \cdot h \quad (3.3)$$

de onde resulta uma relação entre a altura do manômetro ( $h$ ) e a velocidade local ( $v$ ):

$$v = \sqrt{2gh} \quad (3.4)$$

Para o escoamento em um tubo de corrente, a vazão é dada pela integração da velocidade ao longo de uma seção:

$$Q = \int_s \vec{v} \cdot \vec{n} \, dS \quad (3.5)$$

Na prática, esta integração é feita considerando um número  $n$  finito de pontos ao longo de um diâmetro da seção transversal, onde a velocidade média ( $V$ ) pode ser calculada por:

$$V = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (3.6)$$

E a determinação da vazão pode ser determinada em termos da velocidade média ( $V$ ):

$$Q = V \cdot S \quad (3.7)$$

A determinação de quantos pontos e onde eles devem estar localizados, foi motivo de diversos estudos (SHERWOOD, T. K.; SKAPERDAS, G. T. (1939), KINGHORN, F. C. et al. (1972), WINTERNITZ, F. A. L; FISCHL, C. F. (1957)). Os resultados destas pesquisas avaliaram a eficácia da adoção de vários métodos de distribuição dos pontos de medição em função das características de um escoamento proposto.

Estes métodos propõe que a seção de medição seja dividida em  $n$  áreas e em cada uma destes setores, a localização do ponto de medição seja tal que nele a velocidade medida tem um valor igual à média das velocidades dessa mesma região. Nos multífuros, para a definição da posição de seus furos, usa-se desta mesma técnica, que será analisada no modelo proposto por THOI: SOH (1979) descrito posteriormente.

Porém, em determinados casos a distribuição das áreas na seção transversal e a localização dos pontos é dada por um método numérico, onde cada velocidade  $v_i$  deve ser associada a um peso  $w_i$  para que na somatória .possa-se obter um valor representativo da velocidade média ( $V$ ). Assim temos para a seção toda:

$$V = \sum_{i=1} w_i \cdot v_i \quad (3.8)$$

Exemplos de métodos numéricos estão na tabela apresentada a seguir extraída de ASME (1971).

Number of Stations <i>n</i>	Method											
	Centroid of Equal Areas (a)			Newton-Cotes			Chebyshef (a)			Gauss		
	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>
2	0.2500 .7500	0.5000 .8660	1/2	(b) 0 1	(b) 0 1	(b) 1/2	(e) 0.2113 .7887	(e) 0.4597 .8881	(e) 1/2	(e) 0.2113 .7887	(e) 0.4597 .8881	(e) 1/2
3	0.1667 .5000 .8333	0.4082 .7071 .9129	1/3	(c) 0 0.5 1	(c) 0 0.7071 1	(c) 0.1667 .6667 .1667	0.1464 .5000 .8536	0.3827 .7071 .9239	1/3	0.1127 .5000 .8873	0.3357 .7071 .9420	0.2778 .4444 .2778
4	0.1250 .3750 .6250 .8750	0.3536 .6124 .7906 .9354	1/4	(d) 0 0.3333 0.6667 1	(d) 0 0.5774 .8165 1	(d) 0.1250 .3750 .3750 .1250	0.1027 .4072 .5928 .8973	0.3203 .6382 .7699 .9473	1/4	0.0694 .3300 .6700 .9306	0.2635 .5745 .8185 .9647	0.1739 .3261 .3261 .1739
5	0.1000 .3000 .5000 .7000 .9000	0.3162 .5477 .7071 .8367 .9487	1/5	0 0.25 .50 .75 1	0 .5000 .7071 .8660 1	0.0778 .3556 .1333 .3556 .0778	0.0838 .3127 .5000 .6873 .9162	0.2891 .5592 .7071 .8290 .9572	1/5	0.0469 .2308 .5000 .7692 .9531	0.2166 .4804 .7071 .8771 .9763	0.1185 .2393 .2844 .2393 .1185
6	0.0833 .2500 .4167 .5833 .7500 .9167	0.2887 .5000 .6455 .7638 .8660 .9574	1/6	0 0.2 .4 .6 .8 1	0 0.4472 .6325 .7746 .8944 1	0.0660 .2604 .1736 .1736 .2604 .0660	0.0669 .2887 .3667 .6333 .7113 .9331	0.2586 .5373 .6057 .7958 .8434 .9660	1/6			
7	0.0714 .2143 .3571 .5000 .6429 .7857 .9286	0.2673 .4629 .5976 .7071 .8018 .8864 .9636	1/7	0 0.1667 .3333 .5000 .6667 .8333 1	0 0.4082 .5774 .7071 .8165 .9129 1	0.0488 .2571 .0321 .3238 .0321 .2571 .0488	0.0581 .2352 .3381 .5000 .6619 .7648 .9419	0.2410 .4849 .5814 .7071 .8136 .8745 .9705	1/7			
8	0.0625 .1875 .3125 .4375 .5625 .6875 .8125 .9375	0.2500 .4330 .5590 .6614 .7500 .8292 .9014 .9682	1/8	0 0.1429 .2857 .4286 .5714 .7143 .8571 1	0 0.3780 .5345 .6547 .7559 .8452 .9258 1	(f) 0.0435 .2070 .0766 .1730 .1730 .0766 .2070 .0435	(f) 0.0513 .2036 .2964 .4487 .5513 .7036 .7964 .9487	(f) 0.2266 .4513 .5444 .6698 .7425 .8388 .8924 .9740	1/8			
9	0.0556 .1667 .2778 .3889 .5000 .6111 .7222 .8333 .9444	0.2357 .4082 .5270 .6236 .7071 .7817 .8498 .9129 .9718	1/9	0 0.1250 .2500 .3750 .5000 .6250 .7500 .8750 1	0 0.1250 .5000 .6124 .7071 .7906 .8660 .9354 1	0.0349 .2077 -.0327 .3702 -.1601 .3702 -.0327 .2077 .0349	0.0442 .1995 .2356 .4160 .5000 .5840 .7644 .8005 .9558	0.2103 .4466 .4854 .6450 .7071 .7642 .8743 .8947 .9776	1/9			
10	0.05 .15 .25 .35 .45 .55 .65 .75 .85 .95	0.2236 .3873 .5000 .5916 .6708 .7416 .8062 .8660 .9220 .9747	1/10	0 0.1111 .2222 .3333 .4444 .5556 .6667 .7778 .8889 1	0 0.3333 .4714 .5774 .6667 .7454 .8165 .8819 .9428 1	0.0319 .1757 .0121 .2159 .0645 .0645 .2159 .0121 .1757 .0319	(g) 0.0419 .1564 .2500 .3436 .4581 .5419 .6564 .7500 .8436 .9581	(g) 0.2046 .3954 .5000 .5862 .6768 .7361 .8102 .8660 .9185 .9788	1/10			
<i>n</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>	<i>x</i>	<i>r</i>	<i>w</i>			
	Centroid of Equal Areas			Newton-Cotes			Chebyshef					

**Notes**  
(a) All measurements of equal weight  
(b) Trapezoidal rule  
(c) Parabolic rule (Simpson's rule)  
(d) Three-eighths rule  
(e) 0.2 - 0.8 rule  
(f) Two 4-station intervals  
(g) Two 5-station intervals

Tabela 1 - Métodos de localização de pontos de medição e pesos para avaliação de valores médios  
(Média para intervalos lineares:  $1 \geq x \geq 0$ ) (Médias em dutos circulares com intervalos:  $1 \geq r \geq 0$ )  
(ASME - 1971)



### 3.1.2. Equacionamento para medidores deprimogênios

Os medidores deprimogênios são aqueles que intervêm no escoamento com a finalidade gerar uma variação de pressão entre dois pontos onde essa diferença é medida e relacionada com a vazão.

Seu equacionamento pode ser feito através da combinação das equações da continuidade e da energia cinética aplicadas a um volume de controle conveniente. As fronteiras do volume de controle são a seção onde deseja-se determinar o valor da velocidade média, a seção onde está instalado o medidor de vazão e a superfície lateral do conduto.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_c} \frac{v^2}{2g} \gamma \, dV + \iint_{sc} \left( \frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + z \right) \gamma \, \bar{v} \, \bar{n} \, dS = -W_a \quad (3.9)$$

Formulando a equação da energia em termos das cargas presentes no Volume Controle e em seguida dos valores médios das grandezas nas seções 1 e 2, obtém-se:

$$H_1 = H_2 + H_a \quad (3.10)$$

ou seja,

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + H_a \quad (3.11)$$

da equação da continuidade:  $V_1 = V_2 \frac{S_2}{S_1}$  (3.12)

e adotando-se:  $z_1 = z_2$  e  $H_a \cong 0$  (desprezível)

determina-se a expressão:

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}} \sqrt{\frac{2 DP}{\rho}} \quad (3.13)$$

e para a vazão em volume:

$$Q = V_2 \cdot S_2 \quad (3.14)$$

### 3.1.3. Correções para a equação teórica

A equação 3.14 determina o valor teórico da vazão através do medidor, porém é necessário introduzir-se alguns coeficientes de correção para obter o valor real da vazão. Na literatura existem muitos coeficientes propostos para corrigir os diversos efeitos presentes nos fenômenos que ocorrem causados pela presença do medidor e sua interação deste com o escoamento. Também, podem ser definidos fatores de conversão que atualizam esses coeficientes, estabelecidos em condições de referência, para aquelas em que se realiza a medição.

A seguir são apresentadas definições para os principais coeficientes conforme proposta de MILLER (1989):

- Coeficiente de Descarga ( $C_d$ ):

É obtido a partir de ensaios em laboratório, através da relação entre a vazão real e a vazão teórica medida com o instrumento. Geralmente, é usado para corrigir efeitos devido à influência do perfil de velocidades, variação do número de Reynolds, e das hipóteses que desprezam perdas de carga entre tomadas de pressão e devido à localização das mesmas.

$$C_d = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{teórica}}} \quad (3.15)$$

- Coeficiente de Velocidade (E):

É dado pela expressão que considera a relação entre as áreas na seção livre do conduto e naquela onde está instalado o medidor:

$$E = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{S_2^2}{S_1^2}}} \quad \text{ou} \quad E = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (3.16)$$

$$\text{onde: } \beta^2 = \frac{S_2}{S_1} \quad (3.17)$$

- Coeficiente de Vazão (K)

É a combinação do coeficiente de descarga ( $C_d$ ) com o coeficiente de velocidade (E), definido pela fórmula:

$$K = E \cdot C_d \quad (3.18)$$

Em medidores de geometria fixa, com o objetivo de simplificar a equação, o coeficiente de vazão é preferencialmente usado no lugar do coeficiente de descarga.

- Coeficiente de Compressibilidade (Y)

Usado para corrigir, em escoamento de gases, influências na variação da massa específica entre as tomadas de pressão, causada pela presença do sensor, ou por uma diferença de temperatura entre esta tomadas.

- Coeficientes de Correção ( $C_i$ ) causados por outros fatores

O coeficiente  $C_i$  expressa a influência de fatores como dilatação térmica da tubulação e do medidor, correções devido a altitude e localização onde está realizando-se a medição, condições da instalação, e outros.

### 3.1.4. Formulação e coeficientes adotados para os multífuros

Os dois equacionamentos, do Pitot e dos medidores deprimogênicos, apresentam expressões semelhantes que relacionam a raiz quadrada da diferença de pressão (DP) com a velocidade média e com a vazão do escoamento.

Para os multífuros adotam-se coeficientes de correção adequados a cada aplicação, resultando na equação que determina a vazão expressa por:

$$Q = K \cdot S \cdot Y \cdot C_i \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot DP}{\rho}} \quad (3.19)$$

onde:

**Q** - vazão volumétrica

**S** - área da seção transversal reta da tubulação

$\rho$  - massa específica

**Y** - coeficiente de compressibilidade

**K** - coeficiente de vazão

**C<sub>i</sub>** - outros coeficiente de correção

**DP** - pressão diferencial

## 3.2. Modelos e testes de multífuros

### 3.2.1. Investigação de fatores de influência

HICKMAN; BROOKS (1976) apresentam em seu trabalho uma análise sobre o comportamento do medidor fabricado pela Dieterich, com seção transversal circular.

É desenvolvida uma previsão sobre o comportamento do medidor, em que a vazão depende de uma diferença de pressão (DP), onde esta DP resulta

de contribuições discretas de pressão para cada um dos furos conforme esquema apresentado na figura 9 A equação que expressa esta proposta é:

$$DP = a_1 \cdot p_{A1} + a_2 \cdot p_{A2} + b_1 \cdot p_{B1} + b_2 \cdot p_{B2} - p_c \quad (3.20)$$

Onde  $p_{A_i}$  são as pressões em cada tomada de pressão e  $p_c$  é a pressão de esteira, chamada por HICKMAN; BROOKS (1976) de pressão de referência. Os coeficientes  $a_i$ , apresentam o resultado da influência de fatores presentes nas categorias que são a seguir analisadas.

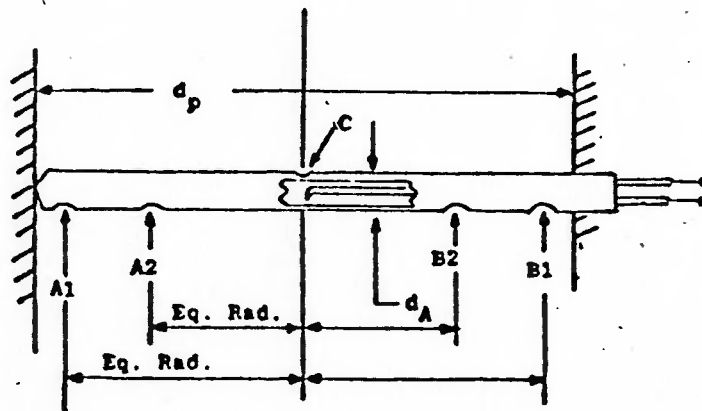


Figura 9 - Esquema para múltifuros (HICKMAN; BROOKS (1976)).

São estudados quatro tipos de categorias de fatores que influenciam a determinação desta  $DP$ , relacionadas a seguir:

- a) Medição da pressão total.
- b) Distribuição das velocidades em condutos.
- c) Medição da pressão de esteira (aqui denominada de referência)
- d) Perda de carga para escoamentos internos ao medidor.

Na categoria a), as leituras de pressão total podem ser influenciadas por dois fatores:

- Turbulência, conforme discussão, também, apresentada por HINZE (1975), OWER; PANKHURST (1966), SCHILICHTING (1979) sobre efeitos em sondas. Para casos práticos são bem maiores que os efeitos sobre a pressão estática, e podem ser avaliados e corrigidos a partir de fatores apropriados, a partir de dados apresentados nas fontes citadas.
- Efeito do gradiente de pressão através dos orifícios de pressão total, que pode ser avaliado apenas para escoamento plenamente desenvolvido, adotando-se correções sugeridas nas referências.

Estes efeitos são pequenos e produzem correções que podem ser desprezíveis em comparação à outras incertezas da técnica de previsão utilizada.

Na categoria b) é feita a análise de influência da distribuição de velocidades ao longo de uma seção transversal, no medidor. O trabalho de Nikuradse, de onde surge a lei da potência para caracterizar o perfil de velocidades, detalhada em SCHILICHTING (1976), traz informações sobre o comportamento da velocidade em diferentes pontos do diâmetro. Esta investigação está detalhada no próximo item (3.2.2.).

Na categoria c), os vários efeitos que afetam a pressão estática, ou pressão de esteira neste caso, podem ser avaliados através do estudo do escoamento em torno de um cilindro.

Dados sobre o comportamento do escoamento em torno de cilindros, especialmente de seção circular, podem ser obtidos em várias referências como: ACHENBACK (1968), DELANY; SORENSON (1953); BOTHAM (1963); ROSHKO (1961), SCHILICHTING (1976) e HINZE (1959), entre outros.

A distribuição de pressões em torno de um cilindro é geralmente representada por dois adimensionais: o número de Reynolds ( $R$ ) e pelo coeficiente de pressão ( $C_p$ ), que é definido por:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad (3.21)$$

onde:  $p$  é a pressão na superfície do cilindro, e  $p_\infty$ ,  $V$  e  $\rho$  são valores para o escoamento ao longe

Resultados experimentais nos informam que o coeficiente  $C_p$  diminui da parte frontal para trás do cilindro, assumindo valores de pressão efetiva negativos. Para determinados valores de  $R$ , ocorre o descolamento da camada limite devido ao gradiente adverso de pressão. Este descolamento cobre grande parte de trás do mesmo, e desde que o escoamento não volte a aderir na superfície, na região de trás, o coeficiente  $C_p$  permanece praticamente constante.

Para determinar o valor da pressão de referência  $p_c$  pode-se usar dados da bibliografia para  $C_p = C_p(R, \theta)$ , com  $p = p_c$  e  $\theta = 180^\circ$ .

Dessas referências sabe-se que mudanças no coeficiente de arrasto, que pode ser relacionado com a pressão de referência, ocorrem devido às características da camada limite. Para baixos números de Reynolds, o atrito viscoso é alto, e na medida que aumentamos o valor para Reynolds, os efeitos viscosos diminuem e os efeitos inerciais predominam. Para Reynolds em torno de  $10^5$ , calculado em função da geometria do cilindro em escoamento livre, a camada limite começa a ser turbulenta, os pontos de separação mudam de posição, e como consequência a esteira torna-se menor e o arrasto diminui. Para Reynolds ainda maiores, o arrasto volta a aumentar, causando um acréscimo no seu coeficiente. A figura 10 apresenta gráfico que ilustra resultados experimentais para este fenômeno.

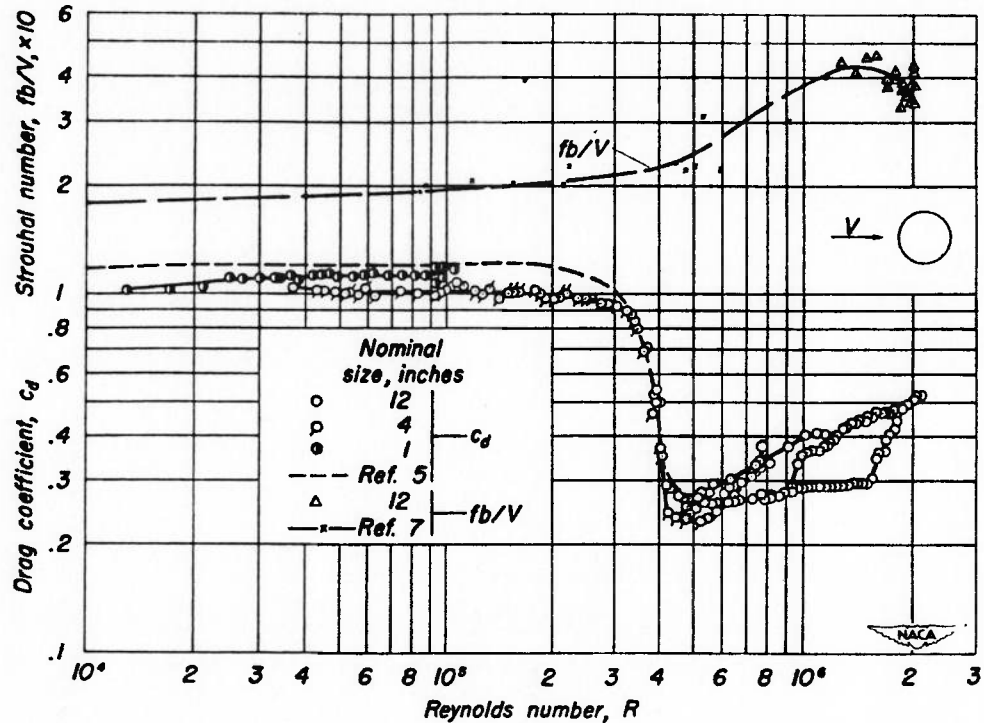


Figura 10 Coeficiente de arrasto em função do Número de Reynolds para escoamento em torno de cilindros de várias dimensões (DELANY; SORENSON (1953)).

Podem estar presentes outras influências na pressão de referência, consideradas de ordem secundária como a rugosidade da parede do cilindro. Porém, em casos práticos a rugosidade pode ser ignorada, desde que na fabricação a superfície do sensor possa ser considerada lisa.

Quanto à categoria d), ela contabiliza a influência da perda de carga, devido à interação dos quatro orifícios, quando ocorre escoamento no interior do medidor.

As condições do escoamento local na vizinhança de cada orifício pode ser representada por uma das três situações que relacionam a pressão no interior do medidor ( $P_{\text{interna}}$ ) com a pressão de estagnação na entrada do furo ( $P_{\text{estagnação}}$ ):

- $P_{\text{interna}} = P_{\text{estagnação}}$  : Equilíbrio, não há escoamento



- $P_{\text{interna}} < P_{\text{estagnação}}$  : Ocorre escoamento para dentro do orifício.
- $P_{\text{interna}} > P_{\text{estagnação}}$  : Ocorre escoamento para dentro do orifício.

A possível interação entre orifícios através de escoamento entre eles é função do perfil de velocidades. Caso haja escoamento pode identificar-se perdas de carga singular e distribuída no trecho percorrido entre um orifício e outro.

HICKMAN; BROOKS (1976), estimaram que para instrumentos similares aos da figura 9, fabricados com seção transversal com diâmetro de 25,4 mm (1"), a perda de carga entre os dois furos próximos à parede do conduto é dada pelo produto do coeficiente 0,005588 pelo diâmetro da tubulação onde o sensor será instalado. Afirmam, porém, que testes são necessários para confirmar esta relação.

Para um escoamento axisimétrico em duto, considerando o medidor com quatro orifícios, não há escoamento entre os orifícios centrais. Assim o tubo interpolador sente a pressão de estagnação, menos a perda de carga que ocorre entre os dois orifícios das extremidades.

Como consideração final, para a análise da perda de carga, aponta-se que pelo fato de haver a presença de tubos transmissores de pressão localizados internamente na metade superior do cilindro, ocorre maior perda de carga nesta parte que na outra, pois a área livre interna é diferente. A incorporação deste fato pode ser feita através de fatores adequados.

### **3.2.2. Técnica para avaliação de valores médios**

Para prever o valor da velocidade média, e conseqüentemente da vazão, medido através do multífuro, fez-se uma simulação com o uso de equações empíricas. Este valor é comparado com o a velocidade média obtida através de uma medição com tubo de Pitot comum, e da integração do perfil de velocidades. O método proposto por THOI; SOH (1979) para avaliar os

resultados oferecidos pelo medidor multifuro, supõe que seja estabelecida uma geometria e definida a distribuição dos orifícios de pressão de estagnação como apresentado a seguir.

A distribuição adotada para as tomadas de pressão de estagnação segue o método de Chebyshev <sup>2</sup>, utilizando-se quatro orifícios que possuem o mesmo peso na ponderação das pressões medida por cada um deles.

Para uma medição realizada com um tubo de Pitot padrão, a velocidade média ( $V$ ) resulta como uma média aritmética simples das contribuições das velocidades avaliadas em cada ponto ( $v_i$ ):

$$V = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i \quad (3.22)$$

mas a velocidade pode ser escrita em termos de  $h$  conforme equação 4 demonstrou, de onde obtém-se:

$$\overline{h} = \frac{1}{4} \left( \sum_{i=1}^4 h_i \right) \quad (3.23)$$

Para o multifuro, utiliza-se o resultado apresentado por TAYLOR (1963), onde para um corpo vazado internamente que possua orifícios ligando-o com o meio externo, a pressão média resultante no interior do corpo é relacionada com as contribuições das pressões nesses orifícios através da equação:

$$\overline{DP} = \frac{\sum_{i=1}^n DP_i}{n} \quad (3.24)$$

<sup>2</sup>. Apresentado por ASME (1971) - reproduzida na tabela 1.

que pode ser reescrita em termos de  $h$  para o nosso modelo do multifuro com 4 furos dirigidos para montante:

$$\sqrt{h} = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sum_{i=1}^4 h_i} \quad (3.25)$$

que formulada em termos de velocidade é:

$$V' = \sqrt{\frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 v_i^2} \quad (3.26)$$

onde  $V'$  é o valor da velocidade média.

Utilizando a lei da potência de  $1/n$ , com  $n=7$ , para definir um perfil de velocidades:

$$\frac{v_i}{V_{\max.}} = \left( \frac{y_i}{r_t} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.27)$$

pode-se obter resultados de velocidade média para cada um dos equacionamentos propostos, e fazer comparações. Assim, a equação 3.22 assume a forma:

$$V = \frac{1}{4} V_{\max.} \sum_{i=1}^4 \left( \frac{y_i}{r_t} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.28)$$

e a equação 3.26 fica:

$$V' = \left( \frac{V_{\max.}}{2} \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^4 \left( \frac{y_i}{r_t} \right)^{\frac{2}{7}} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (3.29)$$

Assumindo a distribuição de 4 pontos segundo Chebychef temos:

$$y_1 = y_4 = 0,1119$$

$$y_2 = y_3 = 0,5403$$

substituindo-se nas equações 3.28 e 3.29 e comparando os resultados temos:

$$\frac{V'}{V} = 1,0063$$

que representa uma diferença percentual menor que 1% nas velocidades médias, para um perfil de velocidades que obedeça a lei da sétima potência, medidas pelo multímetro e por um Pitot.

Pode-se concluir que, obedecidas as propostas de Taylor e Chebychef, os resultados da medição com o tubo de Pitot e com o multímetro devem proporcionar valores próximos.

O valor obtido pelo multímetro ( $V'$ ), pode também ser comparado com a velocidade média ( $V''$ ) calculada integrando-se o perfil de velocidades ao longo de toda a seção:

$$V'' = \frac{1}{S} \int_0^{r_t} V_{\max.} \left( \frac{y}{r_t} \right)^{\frac{1}{7}} 2 \pi r dr \quad (3.30)$$

que resulta:

$$\frac{V''}{V_{\max.}} = \frac{98}{120} \quad (3.31)$$

Comparando esta equação com a 3.29, temos:

$$\frac{V'}{V''} = 1,0148 \quad (3.32)$$

Assim, o multífuro deve avaliar uma velocidade média cerca de 1,5% maior que a velocidade média calculada através da integração de todo o perfil..

Novas simulações indicam que, para curvas que representem o perfil de velocidades dadas pela lei da potência (equação. 3.27), com  $n=10$  a diferença é de 1% e com  $n=13$  a variação cai para 0,8%.

### **3.2.3. Análise comparativa de geometrias através de resultados experimentais**

A forma geométrica externa do medidor pode assumir várias configurações e tem importante influência no seu comportamento e do coeficiente de vazão. A forma original e tradicional é a cilíndrica, de seção reta transversal circular, contudo a haste do multífuro, que entra em contato com o fluido, pode ser prismática com seção transversal de diferentes geometrias poligonais regulares ou irregulares .

O artigo de BRITTON; MESNARD (1982) traz uma análise sobre o medidor multífuro produzido pela Dieterich, com uma nova configuração geométrica (perfil de diamante), comparando seu desempenho com o modelo anterior, onde a seção transversal do medidor era circular.

Apresenta ensaios realizados com sondas cilíndricas. de seção circular, com quatro furos de tomadas de pressão a montante e quatro furos a jusante, denominada sonda tipo **A**. Utilizou-se ainda uma sonda que possuía os quatro orifícios a montante e apenas um único na parte de trás, identificada como sonda tipo **B** (vide figura 11)

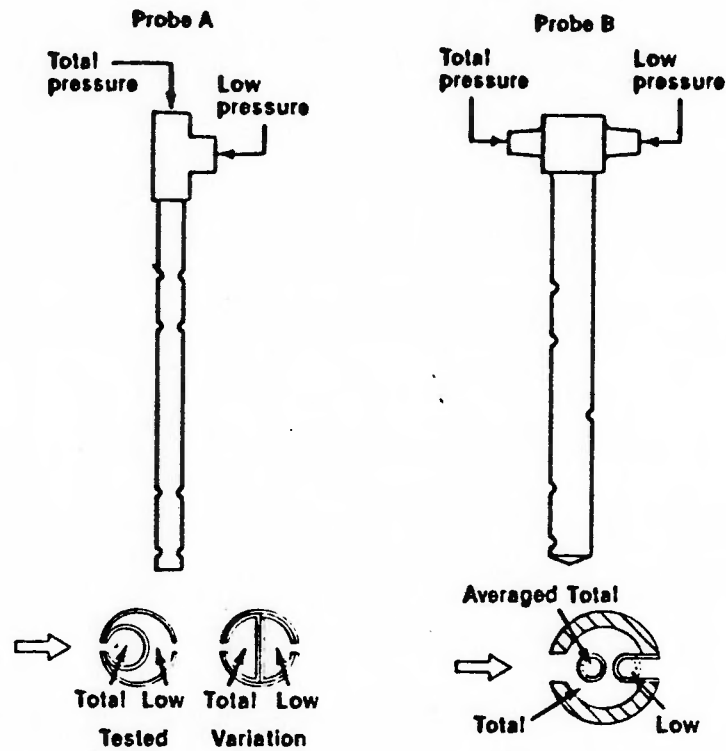


Figura 11 - Modelos de sensores testados (BRITTON; MESNARD (1982))

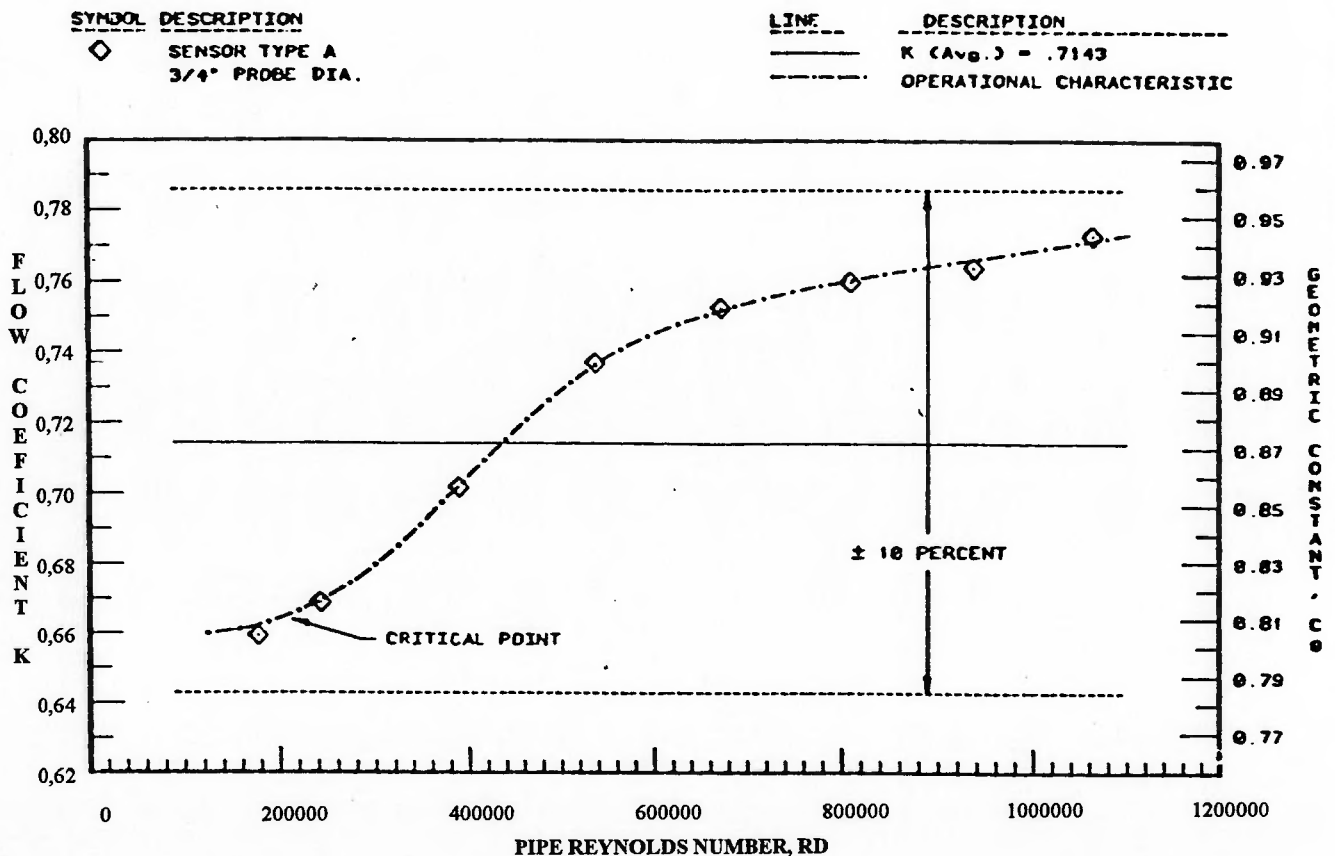
Com o objetivo de obter um instrumento que possuísse um coeficiente de vazão ( $K$ ) com pequenas variações para um amplo intervalo de utilização, foram realizados estudos e testes em busca de um novo perfil para o sensor.

O resultado foi a nova geometria proposta, de um perfil semelhante a um corte transversal de um diamante, parecendo um quadrado com vértices "quebrados", que geometricamente assemelha-se a um octógono irregular.

Os ensaios comparativos foram realizados em um laboratório independente, da *Colorado State University*. Foi utilizada uma linha com tubulação de 150 mm de diâmetro, com trecho reto equivalente a 40 diâmetros, onde escoava água. Para as sondas de perfis circulares e as de novos perfis obteve-se os resultados analisados a seguir.

Para os sensores de perfil circular, de ambos os tipos A e B, o comportamento esteve próximo. A condição crítica ocorria para um valor do número de Reynolds próximo a  $2 \times 10^5$ , como podemos observar nos gráficos das figuras 12 e 13. Neste caso, para definir um valor médio para o coeficiente de vazão é necessário associar um intervalo de variação de  $\pm 10\%$  para seus valores, intervalo também chamado de "limite de exatidão", para Reynolds entre  $10^5$  e  $10^6$ .

Já para os sensores de perfil de diamante ensaiados em condições idênticas não foram identificados pontos críticos claros, embora tenha sido observado que o coeficiente de vazão iniciava uma queda para os menores valores de Reynolds. E o coeficiente de vazão médio foi determinado associado a um intervalo de variação de  $\pm 1\%$ , para a mesma faixa de Reynolds variando entre  $10^5$  e  $10^6$  aproximadamente (figura 14)



Figuras 12 - Resultados para a sonda tipo A (BRITTON; MESNARD (1982))

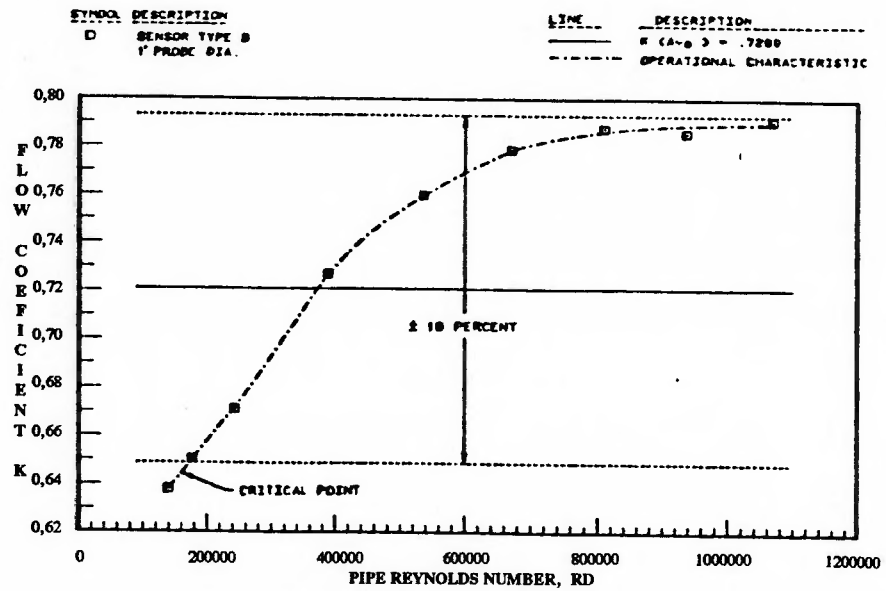


Figura 13 .- Resultados para a sonda tipo B (BRITTON; MESNARD (1982)).

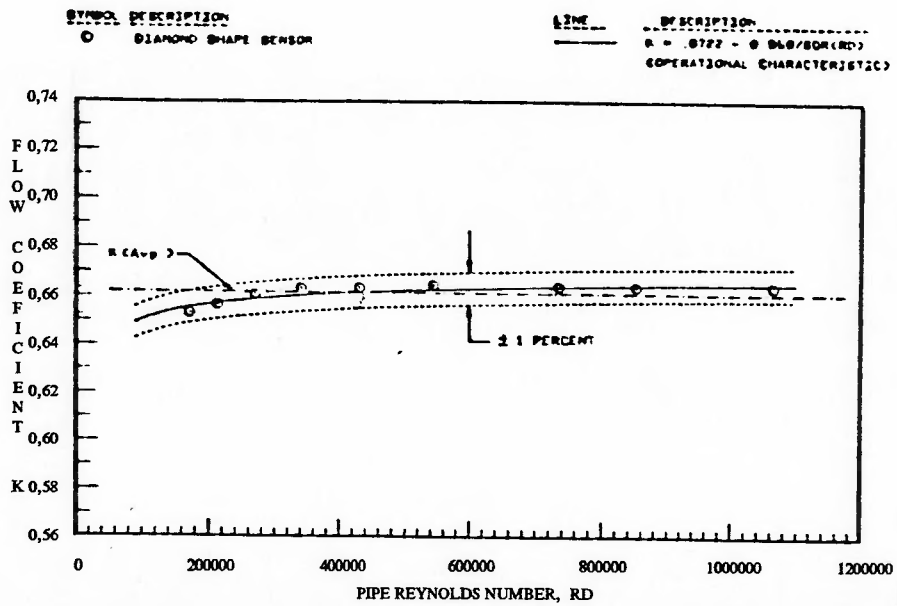


Figura 14 - Resultados para a sonda com perfil diamante (BRITTON; MESNARD (1982)).



O comportamento obtido para os diferentes perfis das sondas pode ser interpretado a partir do estudo aerodinâmico de corpos similares.

Comparando a equação que determina o coeficiente de arrasto ( $C_a$ ) para escoamento em torno de cilindros e a que apresenta a velocidade média em função de DP, temos:

$$C_a \approx \frac{F_a}{\frac{1}{2}\rho V^2 S_c} \quad \text{e} \quad K^2 \approx \frac{\frac{1}{2}\rho V^2}{DP} \quad (3.33)$$

onde  $F_a$  é a força de arrasto sobre o cilindro e  $S_c$  é a área projetada do medidor. Considerando que a diferença de pressão (DP) no medidor possui similaridade dimensional com a força de arrasto por unidade de área ( $F_a/S_c$ ), pode-se obter a seguinte relação:

$$C_a \approx \frac{1}{K^2} \quad \text{ou} \quad K \approx \left(\frac{1}{C_a}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (3.34)$$

Através desta similaridade entre os dois coeficientes pode-se utilizar valores conhecidos para o arrasto em diferentes perfis para prever o comportamento de novas formas para o medidor.

Assim BRITTON E MESNARD, concluem que as experiências mostraram que os primeiros tubos multífuros desenvolvidos, de perfil transversal circular, fornecem significativa variação quando deseja-se estabelecer um valor fixo para o coeficiente de vazão. Estes desvios podem superar o intervalo de  $\pm 10\%$  para escoamentos em tubos com número de Reynolds dentro da faixa de  $10^5$  a  $10^6$ . Este fato desaconselha a utilização destes medidores nesta faixa, e indica seu aproveitamento para baixos números de Reynolds.

Finalizam, avaliando que o novo perfil proposto para estes medidores primários, tipo diamante, demonstrou um desempenho com alta exatidão, repetibilidade e atendendo satisfatoriamente um largo intervalo de utilização.

Foram também obtidos resultados de ensaios para duas outras sondas através do acesso aos relatórios emitidos pelo National Engineering Laboratory - NEL (1985) e pelo Centro Tecnológico de Hidráulica - CTH (1984). Estas sondas possuíam características geométricas similares, e tubos independentes para a transmissão das pressões, sendo um deles o tubo interpolador.

O relatório emitido pelo NEL traz resultados de uma sonda Annubar fabricada com perfil octogonal irregular (diamante) para tubulações de 200 mm (8"), *schedule 40*, conforme apresentado na figura 15.

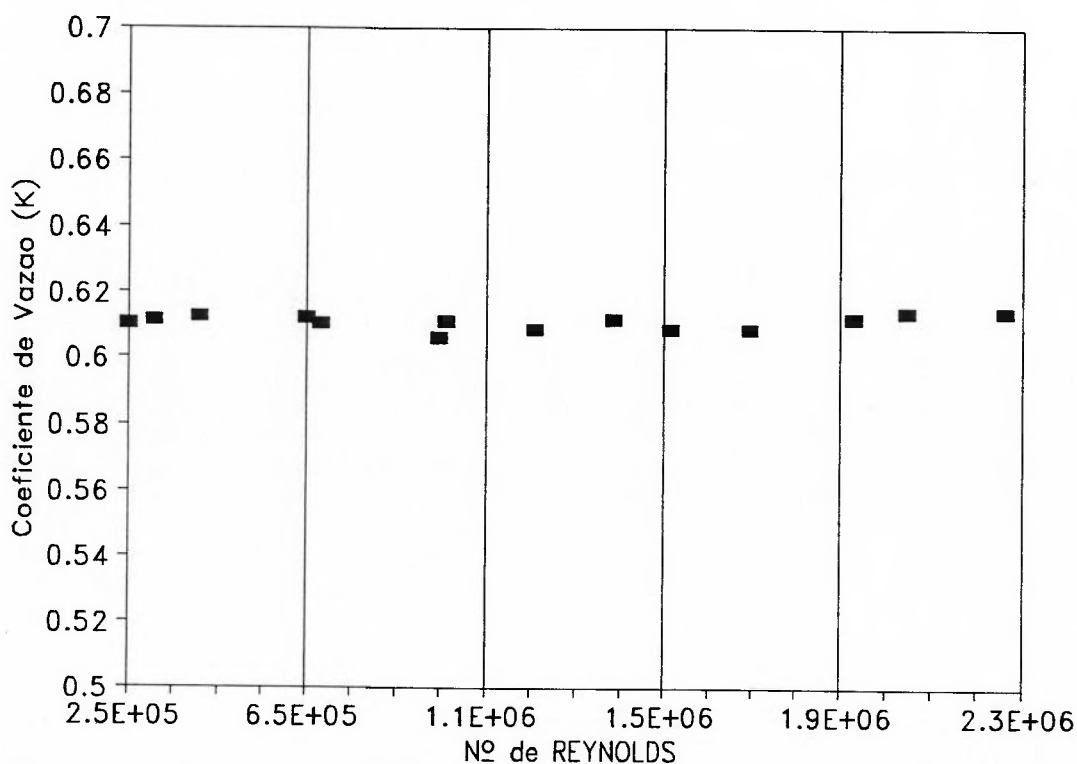


Figura 15 - Resultados para o sensor Annubar ensaiado em tubulação de 200 mm (8") - Laboratório do NEL (1985)

No outro relatório obteve-se os resultados dos ensaios do medidor Sonda 4, produzido pela Digimat, que possuía geometria externa octogonal irregular, fabricado para operar em tubulações de 200 mm (8"), *schedule* 40. Os valores estão apresentados na figura 16.

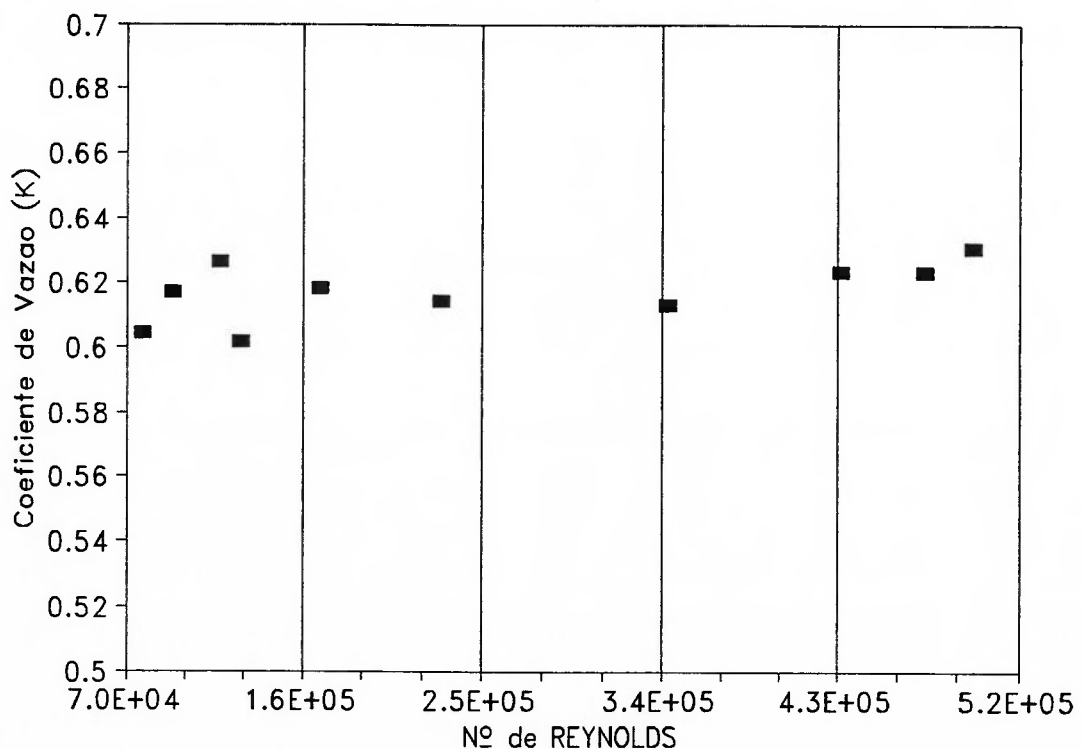


Figura 16 - Resultados para o sensor Sonda 4 ensaiado em tubulação de 200 mm (8") - Laboratório do CTH (1984)

As faixas de Reynolds abrangidas pelos ensaios são praticamente complementares, e indicam pequena margem de variação no coeficiente de vazão (K). Observa-se, também, que para valores de Reynolds menores que  $1,5 \times 10^5$ , estão os valores com maior oscilação para K, ocorrendo uma tendência decrescente. Estes dados confirmam o comportamento dos ensaios para modelos similares apresentados por BRITTON; MESNARD (1982).

## **4. PROJETO E FABRICAÇÃO DOS PROTÓTIPOS**

### **4.1. Levantamento das características construtivas**

Na bibliografia pesquisada foram encontradas formas geométricas e arranjos físicos com diferentes características para os modelos testados. Estas informações somaram-se às obtidas junto a especialistas na área de medição de vazão, definindo-se quais as características construtivas foram investigadas através de ensaios com protótipos fabricados.

Estas características construtivas para sensor são as seguintes:

- a) Geometria externa do cilindro que compõe o medidor definido pelo perfil da seção transversal deste.
- b) Número de orifícios com a função de medir a pressão de estagnação - tomadas de pressão de montante.
- c) Localização destas tomadas de pressão de estagnação.
- d) Diâmetro dos orifícios que atuam como sensores de pressão de estagnação
- e) Número de orifícios que indicam o valor da pressão de esteira - tomadas de pressão de jusante.
- f) Localização do(s) orifício(s) que indica o valor de pressão de esteira
- g) Diâmetro do(s) orifício(s) que mede o valor da pressão de esteira
- h) Dimensões do sensor: relação entre a projeção da área da seção transversal da tubulação e da área projetada da seção longitudinal do medidor.
- i) Arranjo físico interno do medidor: usar um divisor interno formando duas câmaras, ou adotar um tubo que conduzirá a pressão de esteira. Em ambas as alternativas utilizar ou não o tubo interpolador.

## 4.2. Definição das características construtivas dos protótipos

As características construtivas foram analisadas sendo que algumas delas foram definidas como parâmetros fixos, e outras como parâmetros não fixos estabelecendo as especificações construtivas para os protótipos fabricados e testados.

### 4.2.1. Parâmetros fixos

Os parâmetros que estiveram fixos para todos o protótipos foram os apresentados na tabela 2.

Parâmetros fixos		Valor adotado
orifícios de montante (pressão de estagnação)	nº de orifícios	4
	localização dos orifícios	posições seguindo distribuição de Chebyshev
	diâmetro dos orifícios	6 mm
dimensões do sensor	diâmetro da seção transversal	25 mm
	comprimento da haste imersa no escoamento	diâmetro interno da tubulação (155,4 mm)

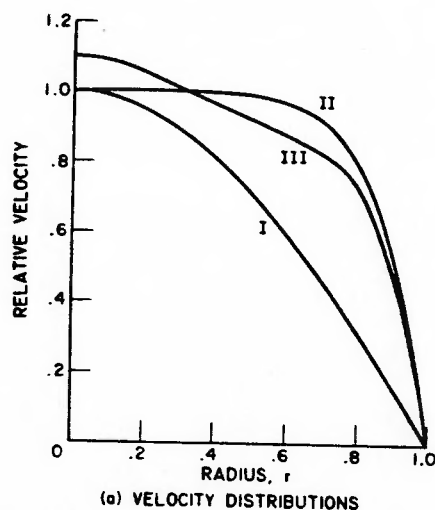
Tabela 2 - Parâmetros fixos para projeto dos protótipos

Foi definida a linha de 150 mm para os ensaios, fixando neste valor o diâmetro da tubulação, e conseqüentemente o comprimento da haste cilíndrica do multífuro que estará em contato com o escoamento. Esta escolha possibilitou avaliação comparativa com resultados disponíveis na bibliografia levantada.

O número de orifícios que mediram valores de pressão de estagnação foi definido a partir da análise dos modelos avaliados no levantamento bibliográfico e considerando o diâmetro da tubulação onde este será empregado.

A localização das tomadas de pressão foram largamente avaliadas por estudos sobre o emprego de tubos de Pitot na medição de vazão. As propostas que obtiveram melhor resultados estão apresentadas em publicações como a BSI 1042 (1983) e o *Fluid Meters* da ASME (1971).

A análise comparativa representada no gráfico da figura 17, apresentada pela ASME (1971) confirma a escolha da localização das tomadas de pressão de estagnação pelo método de Chebyshev. Este método, dentre aqueles que possuem o fator de ponderação ( $w_i$ ) igual para todas as posições (vide tabela 1), apresenta menor erro consideradas três distribuições de velocidade axisimétricas.



	DISTRIBUTION		
	I	II	III
CENTROID OF EQUAL AREAS	-0.26	+1.16	+0.77
NEWTON-COTES	-0.00 <sub>3</sub>	-0.20	-0.08
CHEBYSHEV	-0.00 <sub>4</sub>	+0.02	+0.01
GAUSS	-0.00 <sub>2</sub>	-0.00 <sub>1</sub>	-0.00 <sub>2</sub>

(b) ERROR, %, IN 4-POINT APPROXIMATION

Figura 17 - Resultados para avaliação da velocidade média. a) Perfis de velocidades medidos. b) Erros(%) estimados para métodos diferentes adotando-se 4 pontos de medição. (ASME 1971)

Chebyshev propõe a localização dos orifícios onde as contribuições das pressões possuem igual peso, o que tem fundamental importância para o princípio de funcionamento do medidor. Os resultados satisfatórios na simulação realizada segundo a proposta de THOI; SOH (1979), confirmam a adoção desta distribuição.

A definição dos diâmetros dos orifícios resultou, também, do estudo do comportamento de múltifuros existentes e das recomendações apresentadas para a fabricação destes mesmos orifícios em tubos de Pitot padrão, presentes

nas normas BSI 1042 (1983) e manuais AMCA (1990). Estas publicações apresentam alguns modelos de tubos de Pitot onde o diâmetro do orifício varia entre  $0,1.d$  e  $0,4.d$ , onde  $d$  é o diâmetro da haste do Pitot.

#### 4.2.2. Parâmetros não fixos

Os parâmetros que foram investigados com alternativas diferentes foram: geometria externa do medidor, número de orifícios que medem a pressão de esteira, localização e dimensões desses furos e o arranjo interno do medidor.

Para a geometria da seção transversal do medidor, foram analisadas três configurações geométricas diferentes: duas já experimentadas, a circular e a octogonal irregular, também denominada como perfil diamante, e uma que aproxima-se de um triângulo isósceles de cantos arredondados.

As duas primeiras foram escolhidas por serem as mais tradicionalmente usados em múltifuros, onde dados para faixa de Reynolds não testados trouxeram informações de interesse, além de possibilitar investiga-las em arranjos construtivos inéditos.

A terceira configuração está baseada em dados apresentados por DELANY; SORENSON (1953), sobre o comportamento aerodinâmico de corpos cilíndricos com geometrias de seção transversal diferentes. Estes dados são apresentados na figura 18.

A analogia entre os coeficientes adimensionais de arrasto ( $C_a$ ) e de vazão ( $K$ ) do medidor múltifuro, indica que este perfil pode apresentar bons resultados quando empregado para compor a haste principal do múltifuro. Isto porque os valores de  $C_a$  apresentam estabilidade e pequena variação, para uma ampla faixa de nº de Reynolds. É importante lembrar que os valores de Reynolds estabelecidos nos ensaios para determinação do  $C_a$  de corpos cilíndricos são função de uma dimensão da seção transversal, em geral o

diâmetro, enquanto para medidores de vazão o  $n^\circ$  de Reynolds é estabelecido em função do diâmetro do conduto em que está instalado.

Esta geometria, contudo, pode apresentar maior sensibilidade à desalinhamentos causados pela montagem do medidor na linha onde será realizada a medida. O raio de arredondamento ( $r$ ) dos cantos do triângulo isósceles deve ser escolhido com cautela, pois a estabilidade dos coeficientes pode variar. A figura 18 apresenta resultados para dois valores da relação  $r/b_0$ , onde  $b_0$  é a dimensão da base do triângulo isósceles.

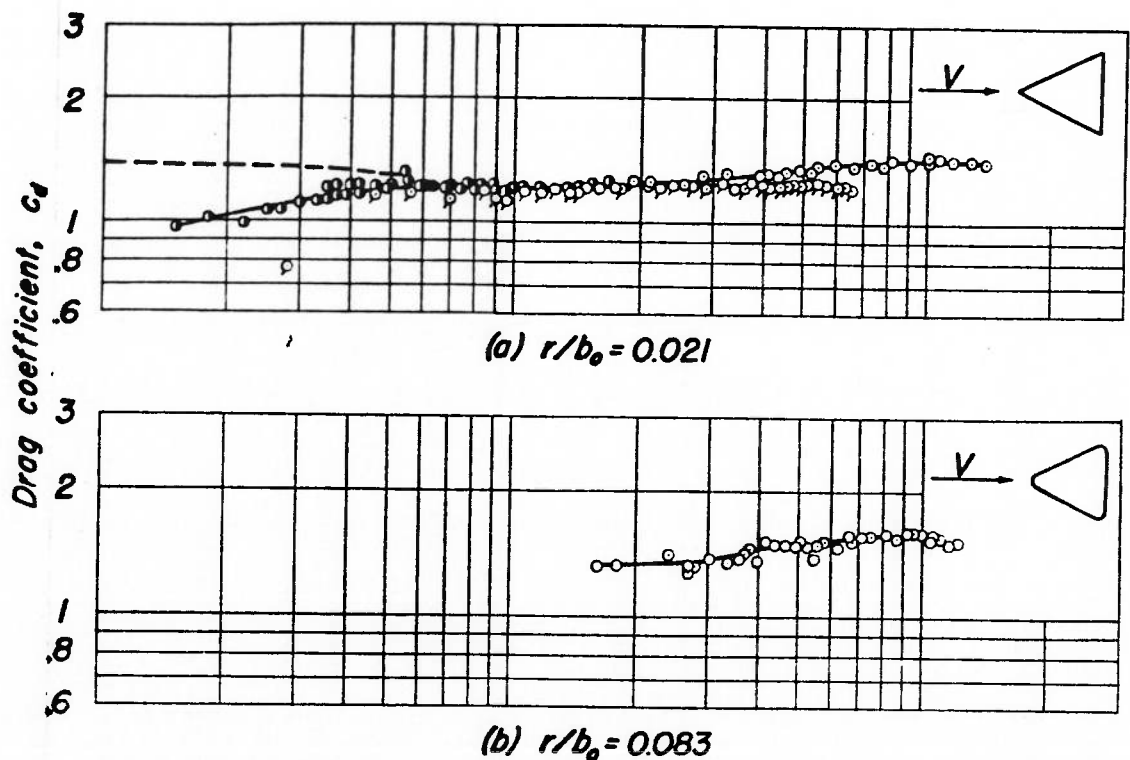


Figura 18 - Coeficiente de arrasto em função de Reynolds para corpos cilíndricos com seção transversal triangular isósceles, DELANY; SORENSON (1953)

Entretanto, não foi possível nesta fase da pesquisa, projetar e construir protótipo com a geometria triangular, devido a limitações de tempo e de recursos humanos e financeiros.

O orifício que mede a pressão de esteira, tem funções similares àqueles que medem a pressão estática, estando localizado em uma região fora do campo principal de escoamento, pois para  $R_D$  ( $n^\circ$  de Reynolds em função



do diâmetro da seção transversal do cilindro) com valores maiores que 20, já ocorre o fenômeno de separação (GROVE et al. (1963), VIEIRA (1971)), e conseqüentemente, trata-se de uma região de baixa pressão. Por causa das características desta região não houve um critério específico para o dimensionamento dos diâmetros dos orifícios. Optou-se por avaliar as alternativas onde tínhamos apenas um único orifício, e em um dos protótipos o caso de 4 furos.

Quanto à localização desses furos, optou-se por soluções simples: para o caso de um único orifício, este fica localizado no ponto médio do diâmetro do conduto. Para o caso de 4 furos, ficam posicionados de modo idêntico aos furos de montante, seguindo a distribuição de Chebyshev.

Para o arranjo físico interior do medidor foram definidas as alternativas: utilização de um tubo para a transmissão da pressão de esteira, ou a divisão da parte cilíndrica do medidor em duas câmaras independentes, utilização de tubos interpoladores para "sentir" a pressão média no interior do multifuro, ou não. Os tubos interpoladores tiveram dois diâmetros adotados: 6,4 mm e 5 mm, na tentativa de avaliar a interferência dessa dimensão nos valores medidos de pressão média de estagnação.

Estas alternativas foram estabelecidas para que os resultados medidos ampliassem o espectro de informações da influência de aspectos construtivos no performance do medidor, podendo na seleção em aplicações específicas, optar por um arranjo ao invés de outro.

#### **4.3. Protótipos fabricados**

Foram projetados quatro protótipos básicos para realização de ensaios de modo a obter-se informações sobre os parâmetros selecionados para investigação. O projeto de fabricação de cada um dos protótipos possibilitou que fossem montados de várias formas ampliando as alternativas de

investigação. A elaboração desses projetos contou com a colaboração do Eng.º Gerard Delmée.

Os protótipos básicos foram identificados através dos números 1 a 4, e as variações realizadas em cada um deles foi caracterizada por uma letra (A, B,..., E). Segue tabela 3 que apresenta os modelos projetados e fabricados.

Protó-tipo N°	Geometria Externa	Arranjo Interno		Orifícios	
		Pressão Total	Pressão Esteira	Pressão Total	Pressão Esteira
1A	Circular	com tubo interpolador de 6,4 mm	com tubo transmissor independente	4	1
1B	Circular	sem tubo interpolador	tubo transmissor independente	4	1
2A	Circular	régua divisora (sem tubo)	régua divisora (sem tubo)	4	1
2B	Circular	régua divisora mais tubo interpolador de 5 mm	régua divisora (sem tubo)	4	1
2C	Circular	régua divisora (sem tubo)	régua divisora (sem tubo)	4	4
2D	Circular	régua divisora mais tubo interpolador	régua divisora (sem tubo)	4	4
2E	Circular	régua divisora mais tubo interpolador	régua divisora mais tubo interpolador	4	4
3A	Octogonal	com tubo interpolador de 6,4 mm	tubo transmissor independente	4	1
3B	Octogonal	sem tubo interpolador	tubo transmissor independente	4	1
3C	Octogonal	com tubo interpolador de 5 mm	tubo transmissor independente	4	1
4A	Octogonal	régua divisora (sem tubo)	régua divisora (sem tubo)	4	1
4B	Octogonal	régua divisora mais tubo interpolador de 5 mm	régua divisora (sem tubo)	4	1

Tabela 3 - Discriminação das características dos protótipos

Cada um dos protótipos projetado e fabricado está com suas características construtivas detalhadas através de desenhos esquemáticos nas figuras numeradas de 19 a 23. Nestes desenhos pode ser observado, particularmente, o modo que cada alternativa adota para o arranjo interno do medidor.

As figuras de números 24 a 31 apresentam os protótipos básicos (1 a 4) montados, suas partes, e os acessórios que cada um deles utilizou nos ensaios.

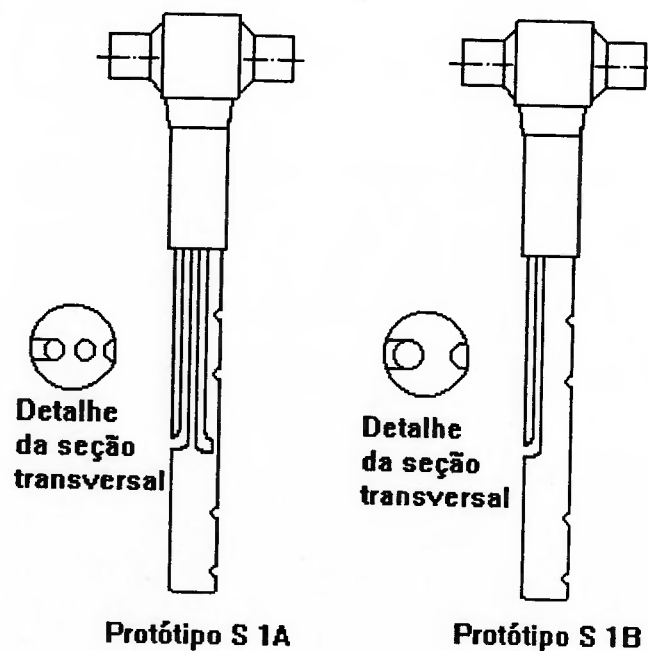


Figura 19 - Desenho esquemático dos protótipos de 1A e 1B

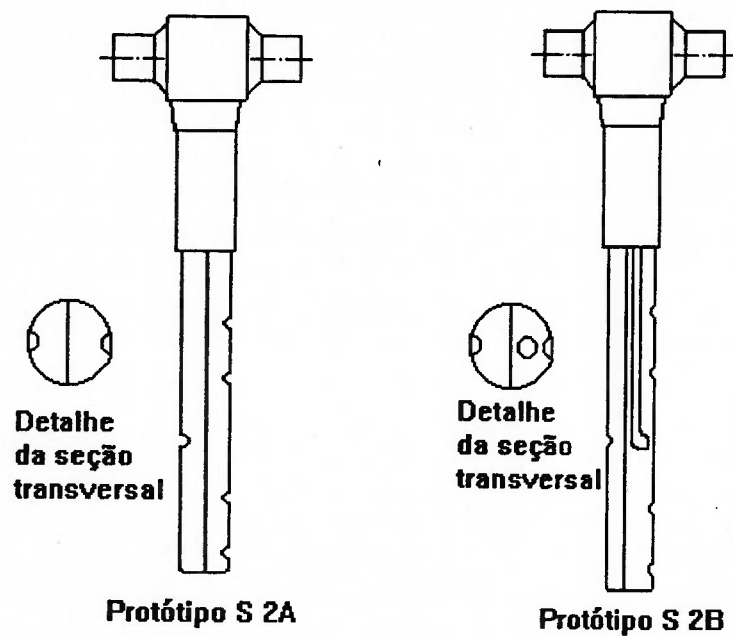


Figura 20 - Desenho esquemático dos protótipos 2A e 2B

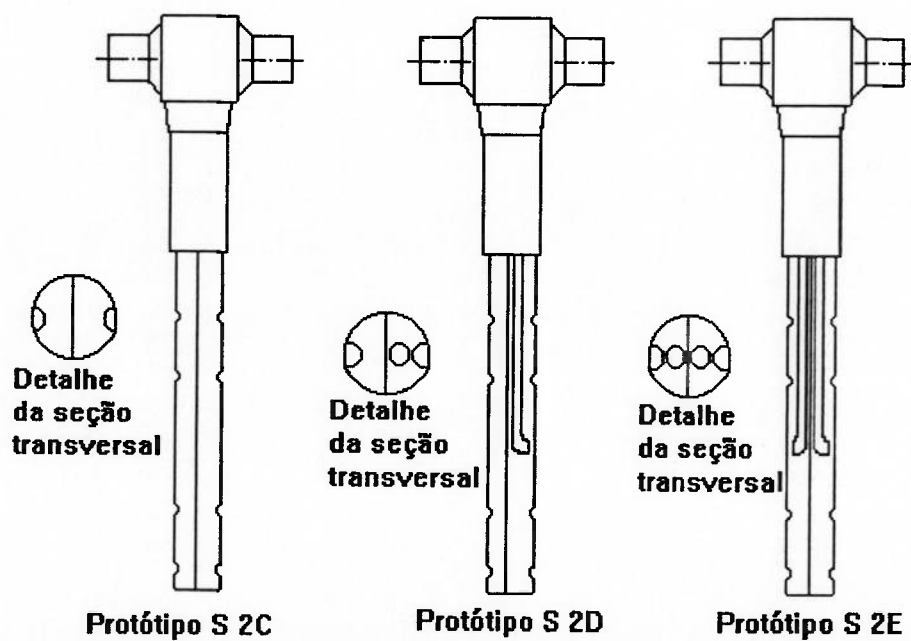


Figura 21 - Desenho esquemático dos protótipos 2C, 2D e 2E

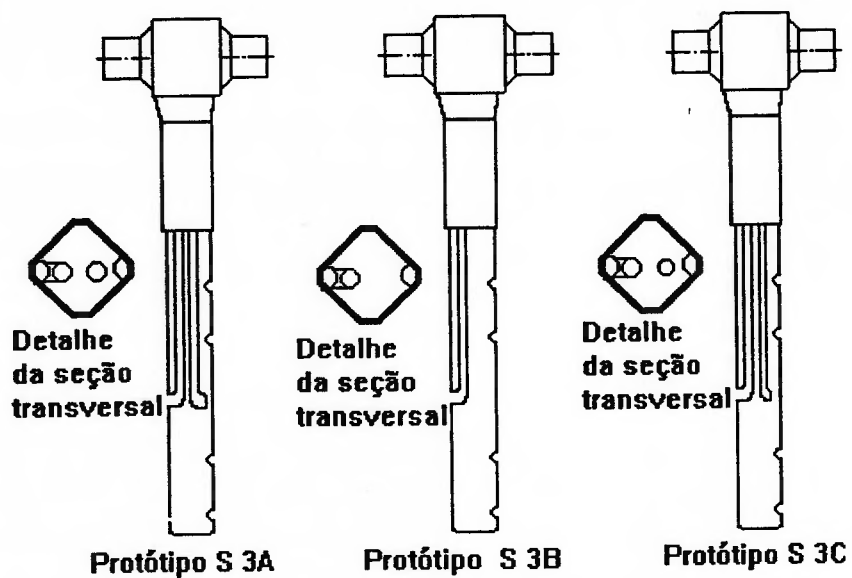


Figura 22 - Desenho esquemático dos protótipos 3A , 3B e 3C

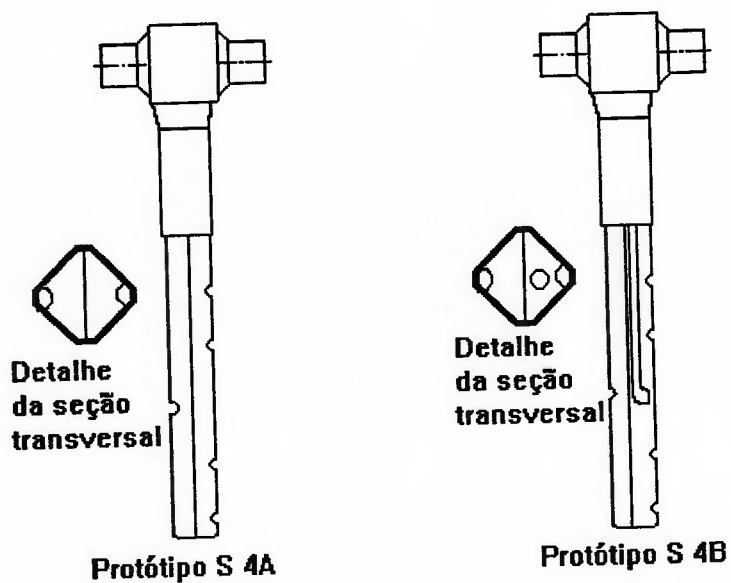


Figura 23 - Desenho esquemático dos protótipos 4A e 4B

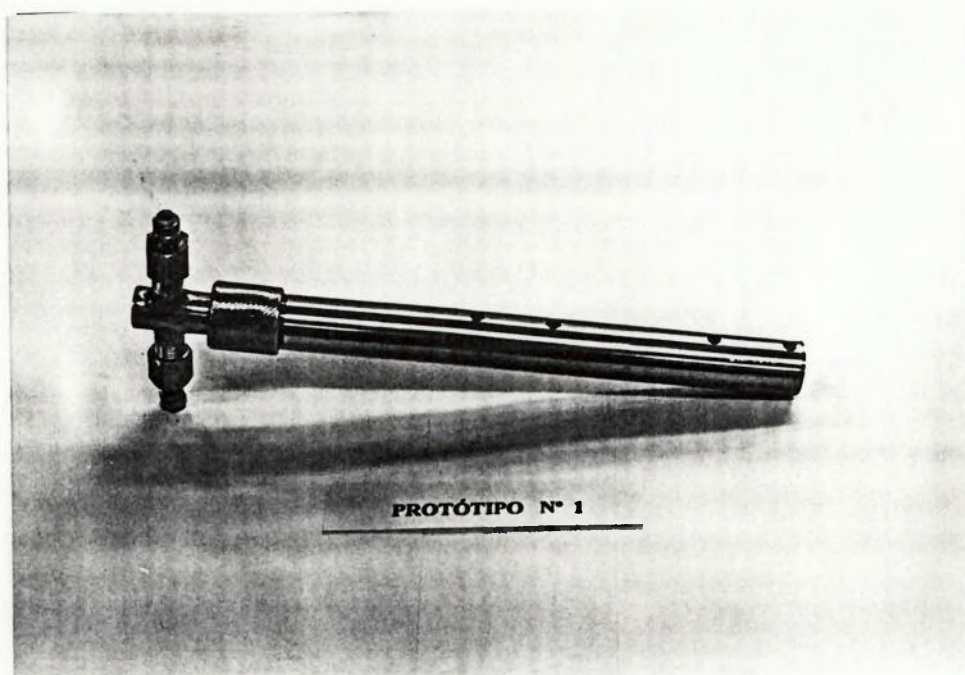


Figura 24 - Protótipo nº 1.

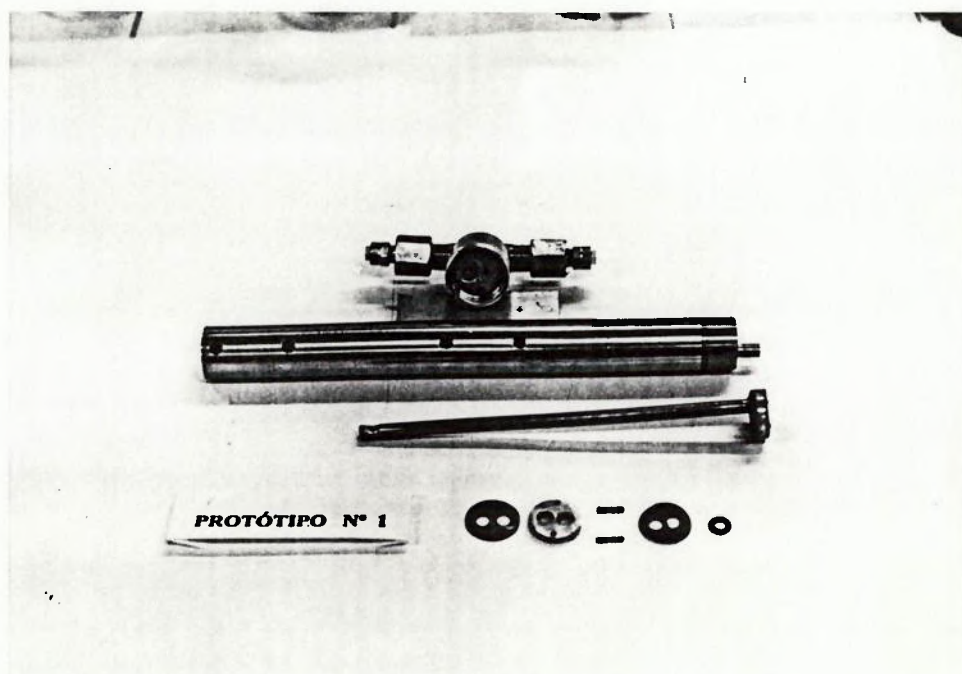


Figura 25 - Protótipo nº 1. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A e B

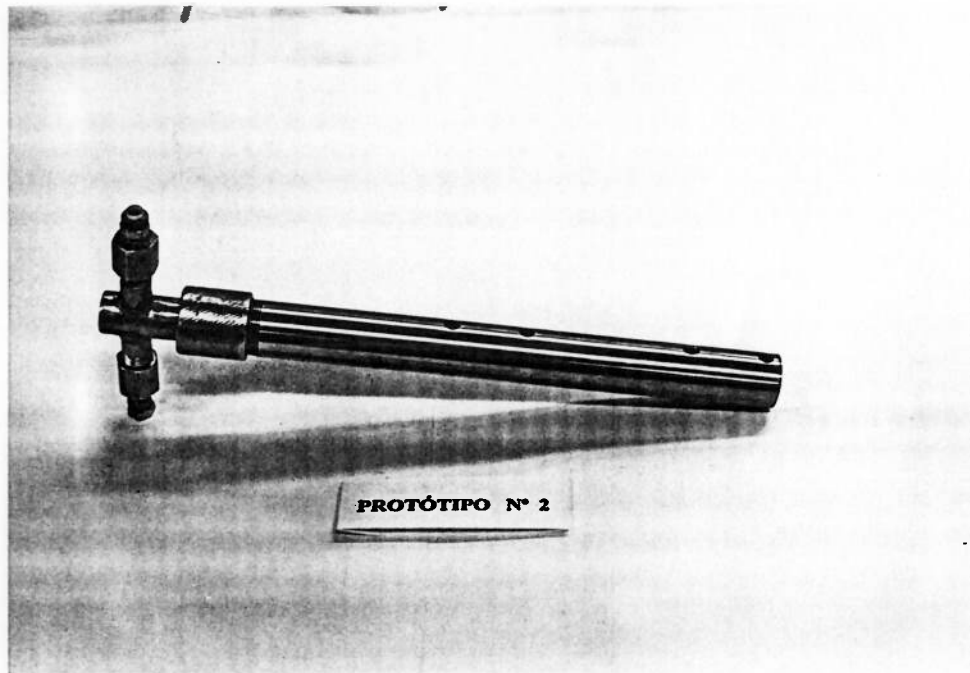


Figura 26 - Protótipo nº 2

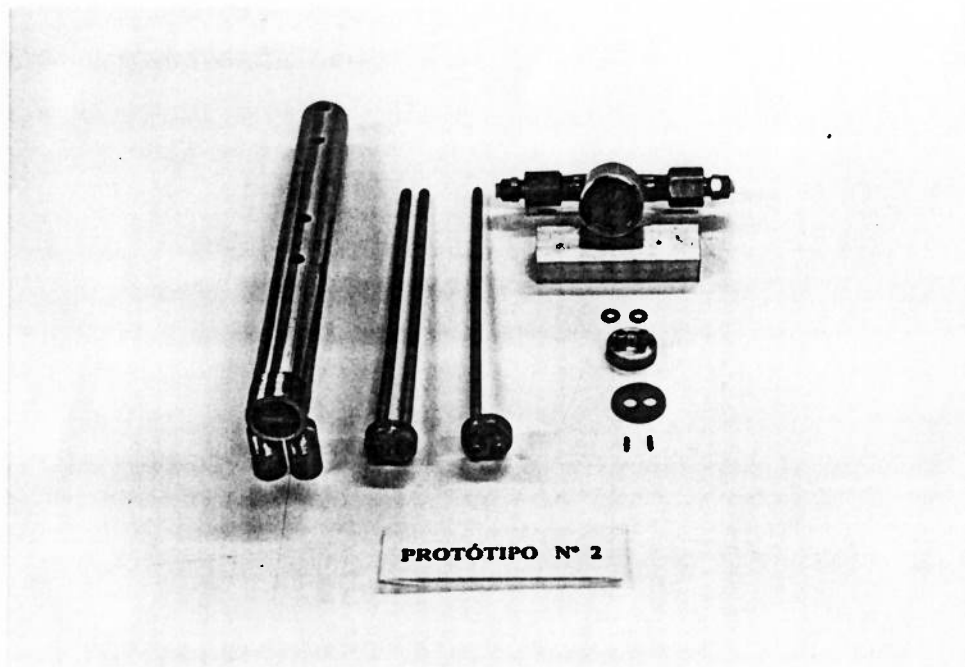


Figura 27 - Protótipo nº 2. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A, B, C, D e E.



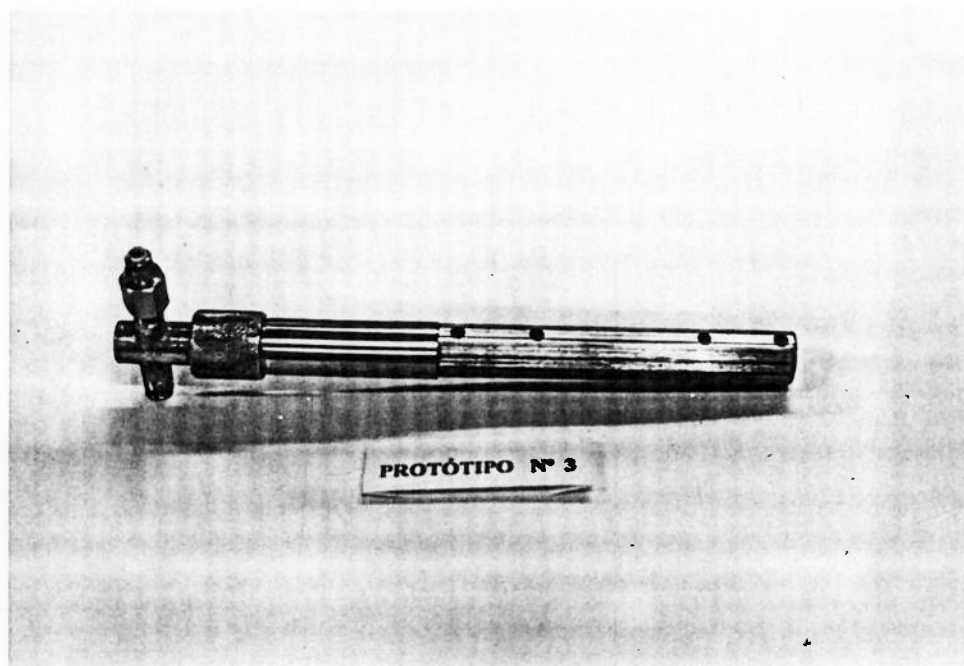


Figura 28 - Protótipo nº 3

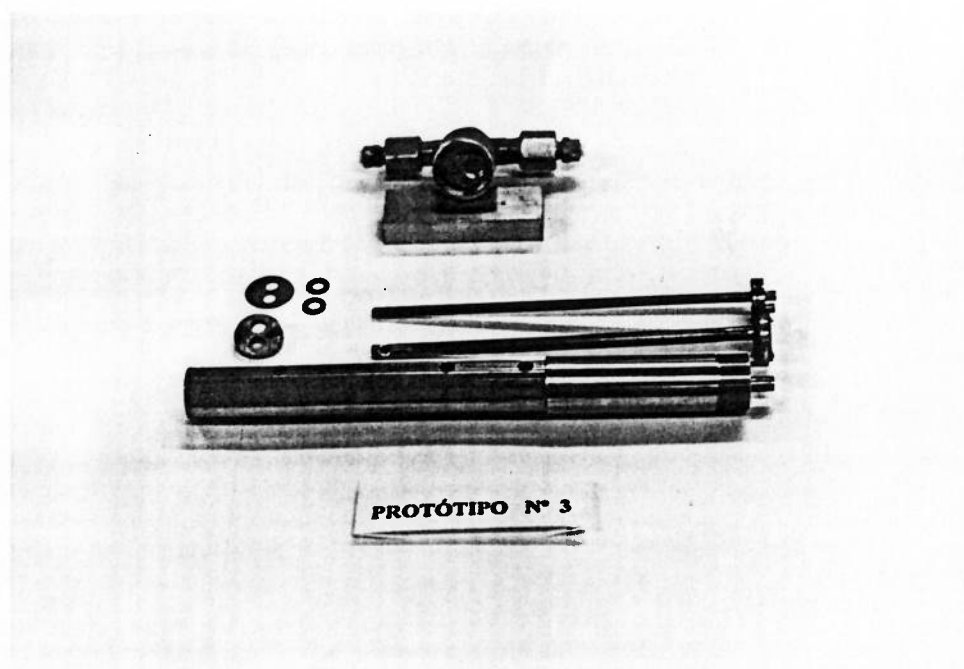


Figura 29 - Protótipo nº 3. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A, B e C



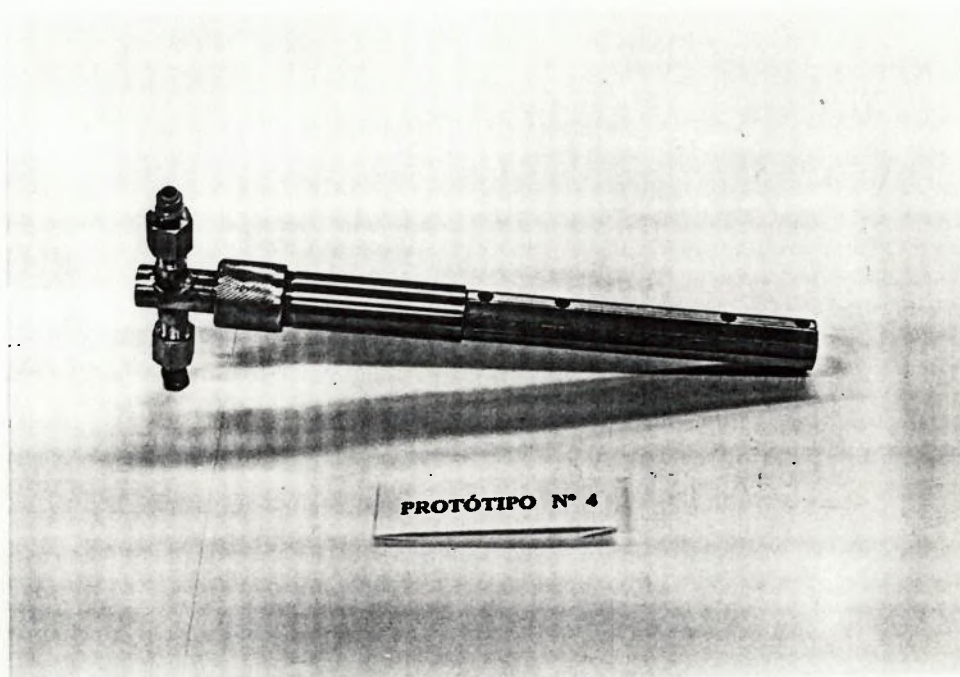


Figura 30 - Protótipo nº 4

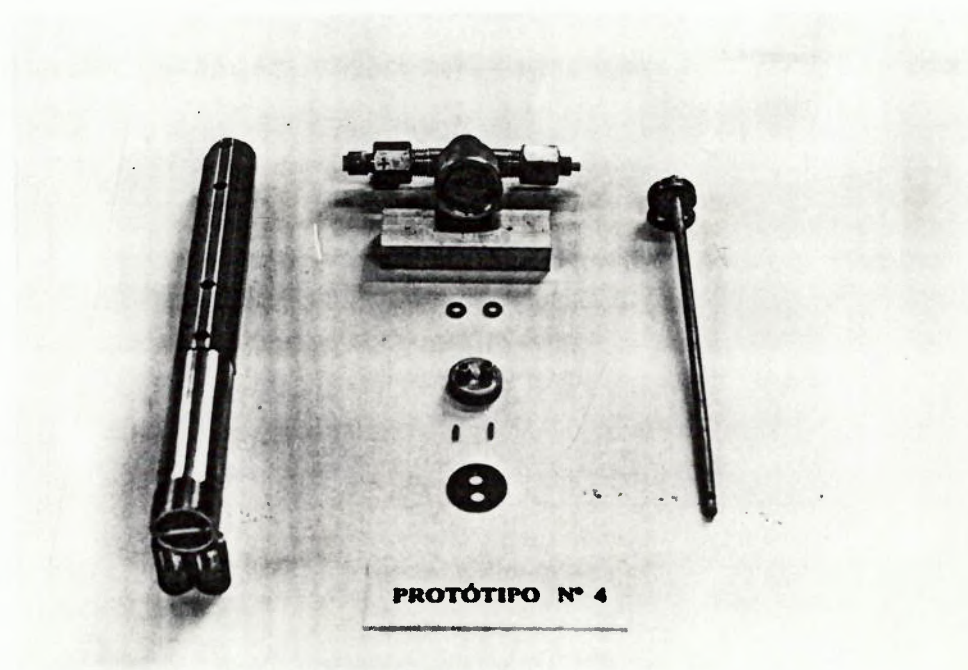


Figura 31 - Protótipo nº 4. Partes e acessórios que foram utilizados para montar as alternativas A e B

#### 4.4. Processo de fabricação

A fabricação dos protótipos foi realizada nos laboratórios do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, utilizando os recursos de máquinas e ferramental disponíveis para cada operação necessária.

Os materiais selecionados foram aço inox 304 e latão, com o objetivo de atingir resistência, boa qualidade de acabamento e durabilidade. Eles foram obtidos através de doação da empresa DIGIMAT.

As operações de usinagem foram executadas em parte por técnicos do Departamento, e em parte pelo próprio autor da pesquisa.

Os protótipos de números 1 e 3 foram fabricados conforme previsto no projeto, utilizando tubos para transmissão das pressões, possibilitando as alternativas A e B através do intercâmbio dos dispositivos produzidos em separado para um mesmo protótipo básico. O desenho da figura 32 traz os principais componentes e sua disposição.

Na fabricação dos protótipos caracterizados pelos números 2 e 4, onde o corpo do multifuro é dividido em duas regiões através de uma barra denominada régua divisora, ocorreram diversas dificuldades. Por isso o processo de fabricação passasse por várias tentativas, que estão descritas a seguir. A figura 33 apresenta uma vista geral e componentes para um protótipo que utiliza a régua divisora.

O projeto original dos modelos 2 e 4 previam a execução de um canal interno no interior do corpo cilíndrico onde seria assentada a régua divisora. As máquinas de eletroerosão disponíveis só possibilitaram a execução no protótipo número 4, devido à limitação no curso vertical da mesma, que não atendia a dimensão do comprimento do número 2.

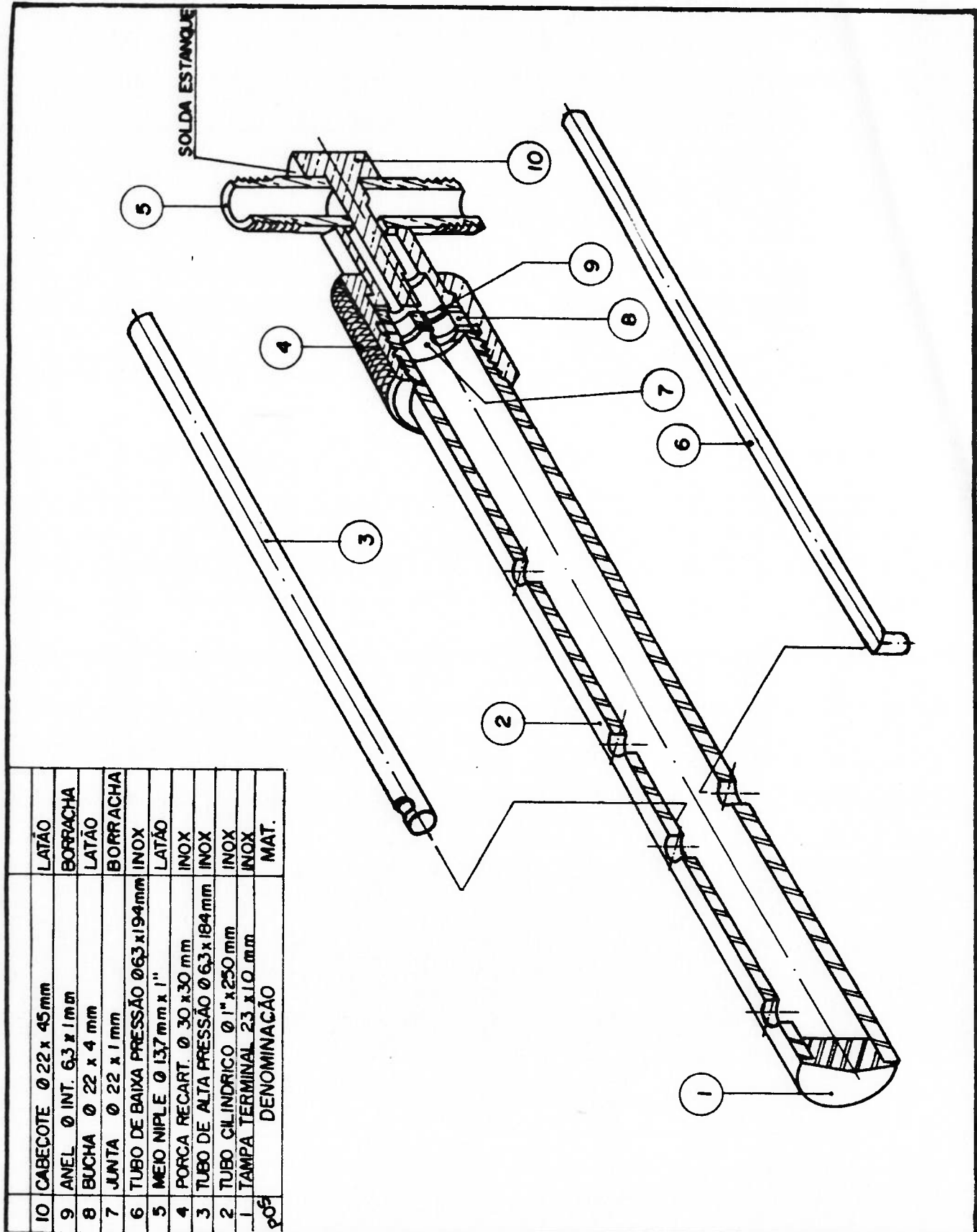


Figura 32 - Desenho de protótipo que utiliza tubos para transmissão das pressões

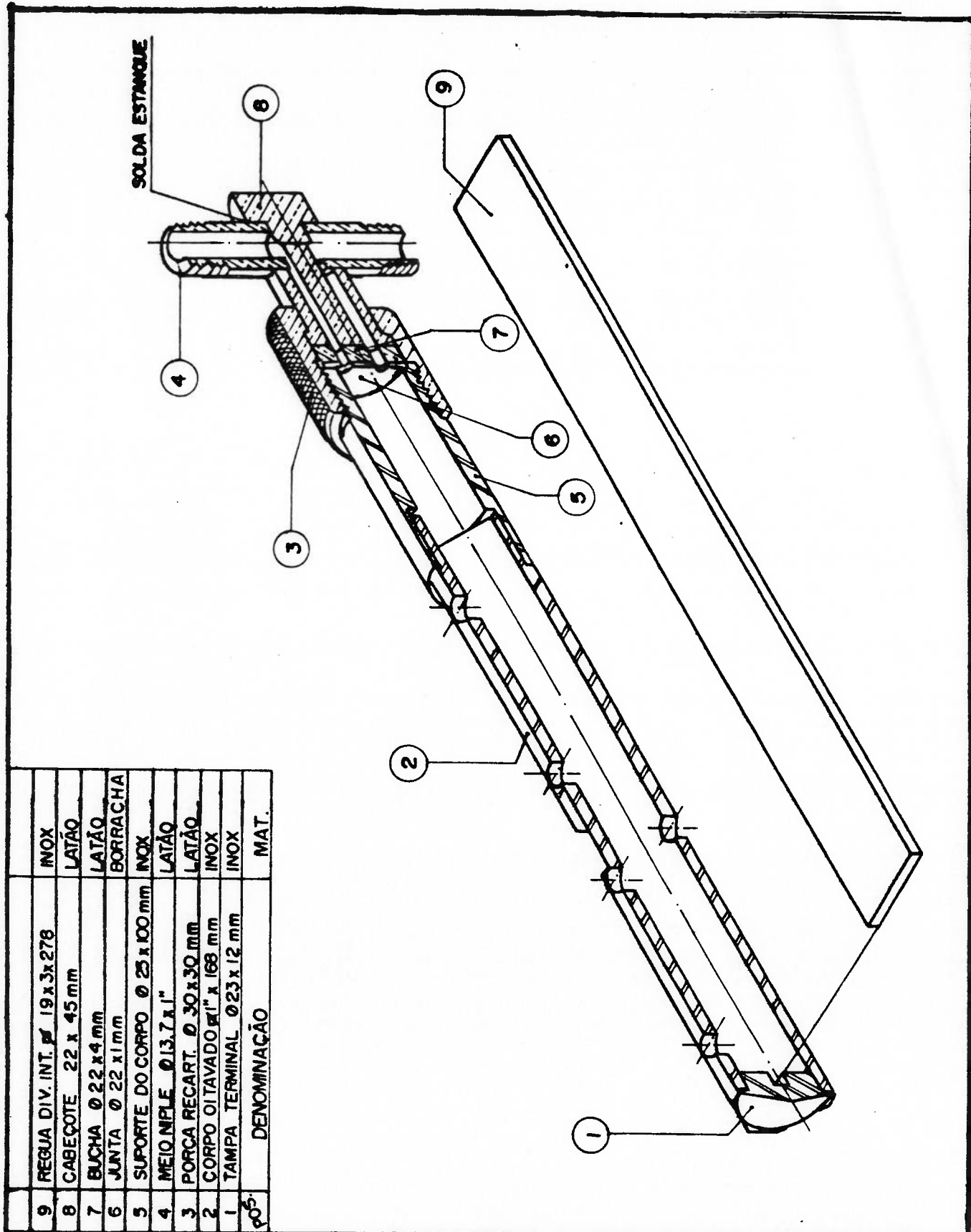


Figura 33 - Desenho de protótipo que utiliza régua divisora para separar a região interna em duas câmaras

O canal no número 4 foi executado em duas etapas, por ser constituído em duas partes, que depois são montadas. Foram medidas as dimensões do canal através de um projetor de perfis nas extremidades das duas peças que compõem o corpo deste protótipo.

A montagem da régua divisora no protótipo 4, onde havia o canal, foi realizada através de várias tentativas de modo a obter duas câmaras incomunicáveis (estanques).

A primeira proposta para viabilização das duas câmaras foi realizar a divisão através da régua de aço inox montada com ajuste forçado médio (H7p6). Foi, ainda, avaliada a possibilidade de realizar a montagem com o auxílio de uma alta diferença de temperatura entre as peças, utilizando nitrogênio no estado líquido para resfriar a régua. Os cálculos indicaram que a contração exigida na largura da régua seria da ordem de 3 centésimos de milímetros. A maior dificuldade, nesta fase, surgiu com as tentativas de fabricação da régua com as características dimensionais requeridas. No processo de fabricação da régua obteve-se uma variação na largura de mesma ordem de grandeza que a diferença exigida entre a régua e o diâmetro interno do medidor para o acoplamento, indicando que em uma provável tentativa de montagem a estanqueidade poderia ficar prejudicada.

A segunda alternativa foi a utilização de régua de alumínio ajustada com folga, e silicone como vedante para as duas câmaras. Após a montagem foram realizados testes e verificou-se que não houve a vedação desejada. Foi verificado ao desmontar a régua que houve leve deformação em um trecho de sua parte lateral, indicando que ao menos um dos canais laterais executado para o alojamento da régua não ficou perfeitamente alinhado com o da outra peça, gerando um degrau no encaixe das peças .



Passou-se, então, a buscar através de novos agentes selantes a obtenção do êxito na vedação de uma régua de inox ajustada com folga. Foram testados os seguintes produtos na vedação:

- tinta comum: resultado indicando a inadequação do selante, dificuldade no processo de cura da tinta.
- tinta bicomponente à base de epóxi<sup>3</sup>: resultado insatisfatório, surgindo pontos de comunicação entre as câmaras. Mesmo com a redução dos vazamentos através da utilização de algumas demãos do selante, microvazamentos persistiram.
- resina iso-oftálica: bom resultado, obtendo-se estanqueidade.

Em seguida buscou-se a vedação das extremidades. Na parte inferior usou-se uma tampa selada com a mesma resina iso-oftálica para obter sucesso. Na parte superior, onde houve a troca dos dispositivos em função das variações testadas (com interpolador ou sem ele...), a melhor solução foi o uso de juntas de borracha <sup>4</sup>.

Para o protótipo número 2, onde não havia canal de alojamento, optou-se por fazer a montagem de uma régua de latão, tentando-se algumas alternativas, executadas simultaneamente no nº 4, para obtenção da estanqueidade das duas câmaras:

- interferência com ajuste forçado da régua, montada em prensa; resultado: os testes indicaram os vazamentos na parte lateral da régua.
- aplicação de tinta epóxi como selante; resultado :os vazamentos persistiam no teste da parede lateral.
- uso de resina iso-oftálica: atingiu-se a vedação desejada

---

<sup>3</sup> Indicação obtida junto ao departamento técnico da empresa Loctite, fabricante de adesivos e selantes, que informou não produzir produto para a presente aplicação.

<sup>4</sup> Alternativas como uso de nylon, borracha de silicone, entre outras, foram avaliadas para a fabricação e/ou montagem das peças na parte superior do corpo cilíndrico, contudo, sem êxito.

Na montagem final de cada tipo de protótipo foram necessárias juntas, pinos para alinhamento, e outras pequenas peças de modo a garantir que não houvesse comunicação entre as regiões de alta e baixa pressão, entre si e nem com o meio exterior.

## 5. PROJETO, FABRICAÇÃO E OPERACIONALIZAÇÃO DO MÓDULO EXPERIMENTAL

### 5.1. Características gerais do projeto

Antes do início do projeto foi realizada uma avaliação das condições laboratoriais existentes no Departamento de Engenharia Mecânica, mais especificamente na Área de Energia e Fluidos, assim como dos recursos existentes nas instituições de pesquisa presentes na USP <sup>5</sup>. Foi também realizada alguma interface com setores da indústria de modo a obter-se subsídios. Com estas informações foram estabelecidas condições para o desenvolvimento do projeto. São elas:

- gerar espaço laboratorial flexível para atender a demanda de atividades de pesquisas e de ensino.
- utilizar como fluido de trabalho o ar, ampliando as possibilidades existentes nos Laboratórios de Mecânica dos Fluidos, onde havia o predomínio da água.
- gerar escoamento em condutos forçados com possibilidade de ampla variação do N<sup>o</sup> de Reynolds, procurando atingir valores próximos a  $5 \times 10^5$ .
- criar condições mínimas de instrumentação que permitissem a avaliação das principais grandezas associadas ao escoamento de fluidos
- utilizar recursos modernos e informatizados, possibilitando que a Universidade aproxime-se das técnicas em uso nas áreas industriais e de serviços.
- viabilizar que os módulos experimentais montados reproduzam a realidade industrial de modo a validar as simulações realizadas.

---

<sup>5</sup> Conforme apresentado em MARIANI, A. L. C. **Relatório de Atividades**, EPUSP, 1992



A partir destas condições definiu-se pela implantação de uma infraestrutura laboratorial que possibilitasse a montagem de módulos experimentais instrumentados que operassem com escoamento de ar, sendo que o primeiro deles foi destinado a ensaios de medidores de vazão tipo multífuro e denominado pela abreviação **MV**.

As características básicas estabelecidas foram:

- Três linhas de fluidos com seções transversais de diferentes áreas, conectadas na sucção de um ventilador radial, de modo a reduzir a variação da massa específica do ar com a temperatura.
- As linhas devem operar de modo alternado, uma de cada vez.
- O escoamento deve estar em regime permanente, e nas seções de testes, sempre que desejado, este deve ser plenamente desenvolvido.
- Instrumentação que permita determinar os valores médios das grandezas associadas ao escoamento, como pressão, temperatura, velocidade e vazão, e das propriedades físicas do ar. Associar a instrumentação a um microcomputador, que faz a leitura e aquisição automática das informações desejadas.

## **5.2. Projeto, fabricação e seleção de equipamentos**

Para o projeto e implantação do projeto do módulo MV, foram estabelecidos os seguintes subsistemas: linhas de escoamento de fluidos e seus acessórios, controle de vazão, conjunto motor-ventilador, instrumentação, sistema para aquisição de dados.

Para cada subsistema que compõe o projeto do módulo experimental estão descritas a seguir os parâmetros técnicos adotados, materiais e equipamento selecionados. Peças produzidas no Departamento de Engenharia Mecânica possuem informações abreviadas sobre o processo de fabricação utilizado.

### **5.2.1. Linhas de fluidos e seus acessórios**

- Tubulações

- Seleção dos diâmetros:

Definiu-se que deveriam haver no mínimo três alternativas para os diâmetros de tubulações independentes nas linhas de testes. Foram escolhidos os diâmetros nominais de 50 mm (2"), 100 mm (4") e 150 mm (6") para as tubulações que comporiam o arranjo físico inicial do módulo.

Os critérios utilizados foram:

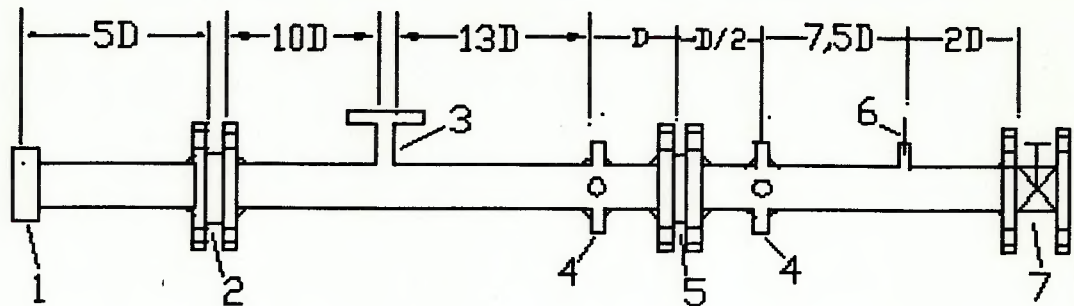
- diâmetros usualmente encontrados em linhas de instalações industriais.
- disponibilidade de espaço físico para montar linhas com comprimento mínimo total de 40 diâmetros.
- diâmetros de interesse para ensaio do medidor de vazão a ser estudado,

- Seleção do Material:

Optou-se por tubos de aço carbono (preto), com costura, fabricados conforme a norma DIN 2440, para viabilizar custos e manter semelhança às condições industriais.

- Definição dos comprimentos dos trechos:

Foram estabelecidos trechos retos entre as seções de instalação dos componentes, adotando-se valores acima daqueles propostos pelas normas consultadas: ISO 5167 (1991) e BSI 1042 (1984). Os trechos retos definidos para a montagem de uma linha de escoamento pode ser visto na figura 34.



### Legenda

- 1-Bocal de entrada
- 2-Condicionador de escoamento
- 3-Medidor Multifuros
- 4-Tomadas de pressão
- 5-Placa de orifício
- 6-Medidor de temperatura
- 7-Válvula

Figura 34 - Distâncias dos trechos retos entre seções para uma linha de escoamento

- Suportes e estrutura de sustentação

Foram fabricados suportes de aço para sustentação das linhas. Compostos de uma coluna fixa a uma base onde foram posicionados braços que sustentam as tubulações. Na coluna foram utilizados perfis "U" perfurados que permitem a variação de altura na fixação dos braços. A base foi fabricada com perfis "U" recortados, onde foi soldada uma haste perfurada que faz a fixação no chão. Esta haste opera como um trilho e que possibilita a variação na posição de fixação do suporte em função do arranjo de tubos que está sendo adotado.

- Conexões:

Selecionou-se o uso de flanges lisas, fabricadas segundo norma ANSI 150 para realizar a ligação entre trechos a partir dos seguintes critérios



- Evitar perturbações indesejáveis no escoamento na região das junções
- Similaridade com as condições industriais
- Praticidade nos processos de montagem e desmontagem, e na colocação de elementos que compõe determinado arranjo como condicionador de escoamento, placa de orifício, válvula, etc..

Para a conexão das três linhas ao ventilador foi projetada uma peça de distribuição convergente, com três entradas e uma saída. Este distribuidor convergente, apresentado na figura 35, foi projetado com ângulo menor possível de modo a evitar perdas de carga desnecessárias, e de modo a não introduzir perturbações indesejáveis no comportamento do escoamento.

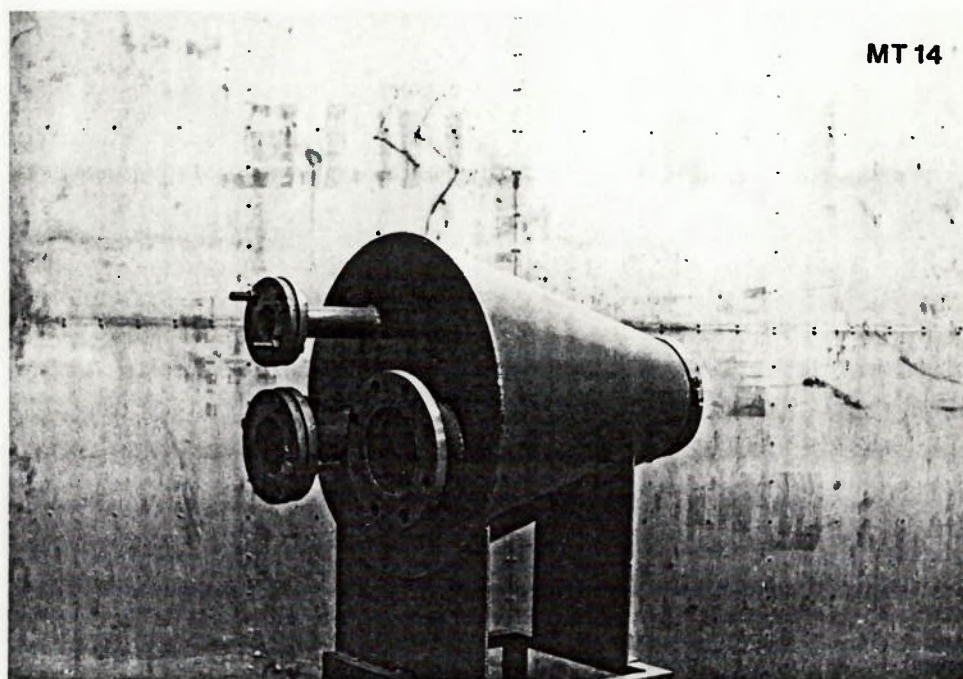


Figura 35 - Distribuidor convergente para acoplamento das linhas ao ventilador

Nas suas entradas conectam-se as tubulações através de flanges e na saída acopla-se o ventilador através de junta de borracha flexível. Esta junta

visa evitar a transmissão de vibrações e ruídos indesejáveis para as tubulações onde são medidas as grandezas de interesse.

- Vedação:

Para garantir a vedação nas junções que possuem flanges decidiu-se pelo uso de anéis de borracha (*O' Rings*) assentados em rebaixos usinados nos flanges antes de serem soldados.

- Bocais de entrada

Para permitir que na entrada da tubulação não ocorram efeitos que perturbem o escoamento, como geração de vórtices, separação, foi projetado uma bocal convergente. Foi adotado o critério apresentado em várias referências pesquisadas como VENNARD (1978) e SMITH (1971), que propõe que o raio de curvatura do convergente ( $r$ ) seja maior que  $0.2 \times D$ , onde  $D$  é o diâmetro da tubulação. Estes bocais são chamados convergentes tipo "boca de sino".

Para os bocais do módulo experimental adotou-se:

$$r = 0,2 \times D. \text{ para tubulação de } 50 \text{ mm}$$

$$r = 0,3 \times D. \text{ para tubulações de } 100 \text{ e } 150 \text{ mm}$$

Foram fabricados em resina de fibra de vidro, a partir de um anel cilíndrico bruto. Recebeu a forma final através de processo de usinagem, com ferramenta construída a partir de gabarito, proporcionando a curvatura desejada. Excepcionalmente, o bocal para a linha de 50 mm foi fabricado em madeira, a partir de um bloco prensado, porém para os de diâmetros maiores este processo não teve sucesso, passando-se a trabalhar com a alternativa da fibra de vidro. Uma peça é apresentada na figura 36.



Figura 36 - Bocal de entrada

- Condicionadores de escoamento:

Analisados os vários modelos apresentados na bibliografia (ASME (1971); MILLER (1989); ISO 5167 (1991); BSI 1042 (1983)), foi selecionado o modelo desenvolvido no Japão denominado Mitsubishi apresentado por AKASHI et al. (1979) apud MILLER (1989). Trata-se de condicionador de placa única, com orifícios de diâmetro fixo, localizados em posições determinadas, de fabricação simples quando comparado com outros modelos. Apresenta resultados muito satisfatórios para o perfil de velocidades na saída e baixa perda de carga.

A usinagem de cada peça foi feita estabelecendo formato circular, furos executados em fresadora com mesa de coordenadas de precisão, estabelecendo a exatidão nas medidas e o acabamento exigidos. Foi feito rebaixo para encaixar no diâmetro interno do tubo. Fabricado a partir de chapa de alumínio, está apresentado na figura 37.

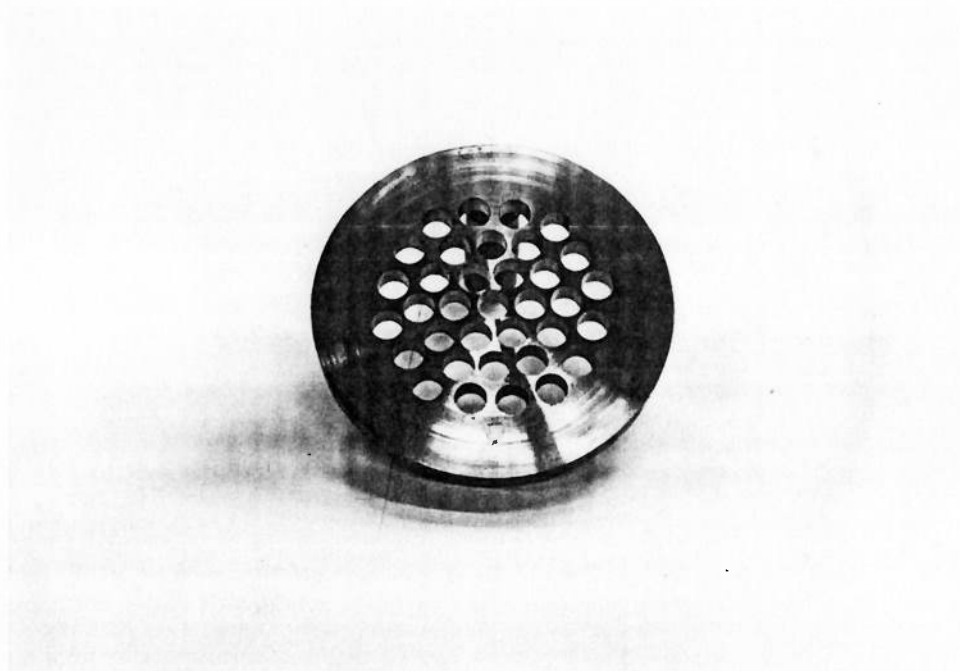


Figura 37 - Condicionador de escoamento tipo Mitsubishi.

- Tomadas de pressão estática:

Foram projetadas adotando-se os cuidados sugeridos na norma ISO 5167 (1991), propostos pela AMCA (1990) e por OWER; PANKHURST (1966). Para uma melhor avaliação do valor médio na seção onde está sendo realizada a medição foi utilizada a técnica denominada "triplo T", proposta por BLAKE (1976). Ela consiste em um tipo de anel piezométrico com quatro tomadas de pressão espaçadas de 90°, onde são ligadas duas a duas através de dois "T"s, e estes dois são conectados a um terceiro que oferece o valor da pressão a ser medido.

- Tomada de temperatura:

Foi concebida de modo a permitir que a extremidade sensora do termopar esteja em contato com o fluido que escoar, sem que haja perturbação excessiva no escoamento e de modo a evitar vazamentos.



- Seção de testes para medidores multifuros

Para a localização da seção de testes adotou-se trechos retos de montante com comprimento equivalente a 10 diâmetros e de jusante 14 diâmetros. Estes valores são superiores aos mínimos recomendados em normas e referências, que indicam entre 4 a 6 diâmetros, para ambos os casos.

Para o adaptador que fixou o medidor na linha de 150 mm, definiu-se que seu tamanho suportaria medidores com hastes de até 25,4 mm (1") de diâmetro. Foram dimensionados, o adaptador, uma anilha e uma porca, conforme dados dos desenhos A1, A2 e A3 do anexo A. Esse conjunto garante o posicionamento e fixação dos medidores nesta seção de modo que, na abertura superior deste adaptador, suavemente cônica, é assentada, penetrando parcialmente, uma anilha flexível e uma porca de aperto. Este sistema também garantiu a vedação. A figura 38 traz as peças utilizadas.



Figura 38 - Seção de testes com peças para fixar os multifuros.



Esta seção foi fabricada através da realização de um furo de diâmetro de 25,4 mm na parede da tubulação, e da soldagem do adaptador vazado, fabricado em aço carbono. Foram também usinadas, conforme dimensões de projeto, uma anilha feita em nylon, e uma porca de aço carbono. A opção pelo nylon como material da anilha, considerou as condições de baixas pressão e temperatura na operação da linha, e o fato de que esta peça deveria estar adequada a montagens e desmontagens freqüentes.

### **5.2.2. Controle de Vazão**

O sistema de controle da vazão é realizado, principalmente, pela associação de duas válvulas borboleta. Uma está localizada no final da tubulação, em cada linha, próximo à entrada do distribuidor de escoamento. A segunda fica na tubulação de saída do ventilador. A combinação das duas permite um ajuste fino na seleção da condição de operação do sistema.

Podem ser associadas, além das duas citadas, as válvulas presentes em linhas que não estão sendo alvo de ensaio, de modo a facilitar a localização do ponto de funcionamento desejado, permitindo uma variação gradual.

### **5.2.3. Conjunto Motor-Ventilador**

- Seleção do ventilador

Inicialmente foi feito o cálculo das curvas características para o sistema, através da estimativa das perdas de carga para cada linha em operação.

A seleção foi feita através de dados apresentados por fabricantes de ventiladores confrontados com as curvas dos sistemas calculados e definiu os seguintes parâmetros:

- Tipo: radial (centrífugo)

- Dados Nominais do ventilador:

Vazão:  $0.75\text{m}^3/\text{s}$  ( $45\text{ m}^3/\text{min}$ )

DP = 88 kPa (900 mm.c.a.)

Rotação máxima: 3500 rpm

É importante observar que na análise para seleção, foram consideradas as situações representadas pelos três sistemas independentes dados pelas três linhas de fluidos com suas respectivas curvas características. Para dar conta desta flexibilidade, com um único ventilador, foi simulado o comportamento da máquina selecionada em outras condições de rotação.

A transmissão entre o motor e o ventilador se faz através de um conjunto de polias e correias. A troca de uma das polias, estabelece diferentes relações de transmissão fazendo com que o ventilador opere em diferentes rotações, com diferentes curvas características.

- Instalação do conjunto motor-ventilador em uma base de inércia

Para isolar e absorver as vibrações produzidas pelo conjunto motor ventilador do piso foi dimensionada e construída uma base de inércia em concreto armado onde este é fixado. Foram considerados os seguintes dados para o dimensionamento do bloco de concreto inercial:

Conjunto Motor-Ventilador:

- Massa total aproximada: 500 kg
- Massa do rotor: 42 kg
- Rotação máxima de operação: 3500 rpm

Obteve-se os seguintes resultados:

- Dimensões da base: (1365 x 971 x 260) mm
- Volume:  $0.345\text{ m}^3$
- Massa de concreto: 828 kg

No isolamento da base do piso foram acoplados 4 amortecedores dimensionados e posicionados conforme a distribuição das massas sobre a base. Estas recomendações utilizadas foram propostas pela SMACNA (1991) e pela empresa VIBRANIHIL, que fez a seleção e doação dos amortecedores. Foram selecionados 04 amortecedores de 5 Hz, sendo 01 modelo AME-5-281, e 03 unidades do modelo AME-5-381. A eficiência de isolamento foi estimada em torno de 97% a 98%.

#### **5.2.4. Instrumentação**

- Sensores de pressão diferencial

Para a medição dos valores de pressão foram selecionados transdutores de pressão diferencial do tipo capacitivos. Foram escolhidos quatro transdutores de pressão para atender toda a faixa de medição:

- 1 medidor para baixas pressões (*draft range*): faixa de 0 a 1490 Pa (0 a 152 mm.c.a.), caracterizada pelo código DP 2
- 2 medidores para faixa de: 0 a 7474 Pa (0 a 762 mm.c.a.), código: DP 3
- 1 medidor para faixa de: 0 a 37368 Pa (0 a 3810 mm.c.a.), código: DP 4

Foi elaborado projeto para montagem de uma fonte de alimentação de corrente contínua para os transdutores de pressão, a partir de componentes eletrônicos encontrados no mercado.

- Medidores de temperatura

Para a leitura de valores de temperatura foram especificados termopares tipo J, de ferro constantan, com bainha em inox, com isolamento mineral e conector compensado. Adotou-se o uso de cabos de extensão constituídos de fio termopar ferro constantan para realizar as ligações necessárias .

- Psicrômetro

Na determinação das propriedades físicas do ar previu-se o uso de um psicrômetro de aspiração. Este equipamento requereu um projeto específico, que foi desenvolvido seguindo as recomendações da ASHRAE (1972). Para operar de modo integrado ao sistema automático de medição foram utilizados termopares na leitura das temperaturas de bulbo seco e úmido.

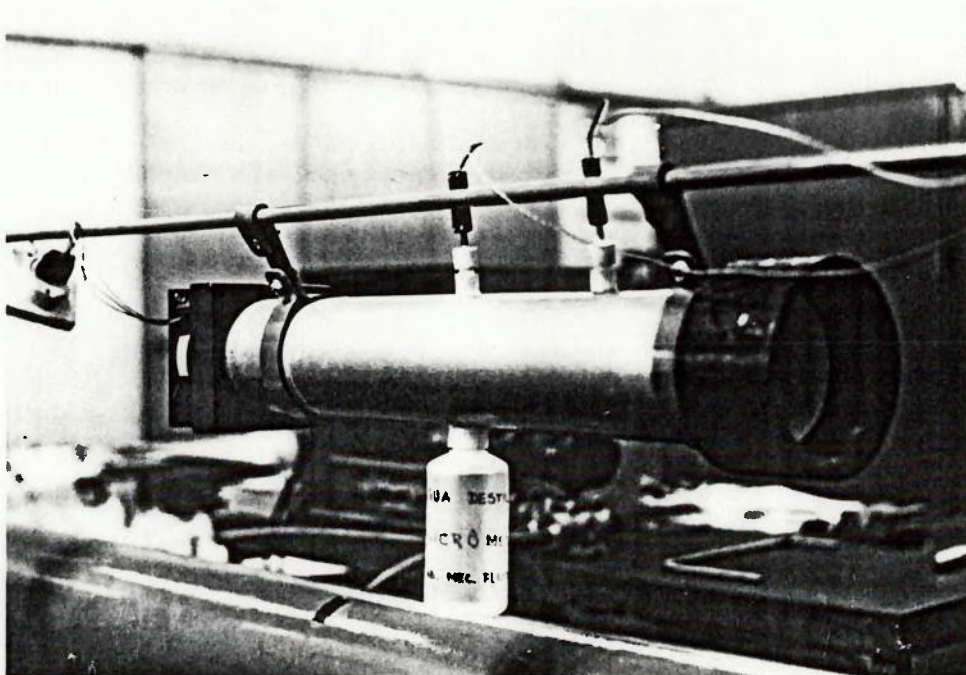


Figura 39 - Psicrômetro de aspiração.

- Medidor de vazão

Placas de orifício foram definidas como padrão para a medição de vazão, sendo projetadas segundo a ISO 5167 (1991), com relação de diâmetros  $\beta = 0,65$  e com tomadas de pressão posicionadas distando  $D$  e  $D/2$ , a montante e a jusante da placa respectivamente. As dimensões das placas para as 3 linhas estão na tabela que segue.

Diâmetro tubulação (nominal)	50	100	150
Diâmetro total da placa	101	158	214
Diâmetro da tubulação	52,8	105	155
Diâmetro do orifício	34,32	68,25	100,1
Espessura total	2,64	5,25	7,70
Espessura interna	1,05	2,10	3,08

Tabela 4 - Dimensionamento das placas de orifício. Medidas em milímetros.

Foram fabricadas a partir de chapa de latão com dimensões rigidamente controladas. Neste processo de usinagem foi realizado um rebaixo para perfeita centralização da placa em relação à tubulação. Na seqüência de montagem, ela foi assentada através do rebaixo em um dos flanges e fixada com dois parafusos, evitando que na montagem da linha houvesse alteração na sua centralização.

- Pressão atmosférica

Na avaliação da pressão atmosférica não foi possível ter um medidor no local de ensaio, sendo determinada através de um barômetro de coluna de mercúrio localizado em um laboratório próximo.

#### **5.2.5. Sistema de aquisição de dados**

O sistema de leitura dos instrumentos foi definido para operar através de um computador tipo PC. Para que este possa acessar estas informações foram selecionadas dois acessórios: uma placa que atua como condicionador (filtro e amplificador) de sinais e uma placa conversora de sinal analógico-digital (A/D), que possuem as seguintes especificações técnicas:

- Condicionador de sinais com 8 canais configuráveis, entradas proporcionadas por amplificador de instrumentação, ajuste de zero,

saídas de 0-5V ou +/- 5V, sensor de temperatura (termistor) fixo na placa.

- Conversor A/D e D/A de 12 bits de resolução, com 16 entradas analógicas, 16 entradas digitais, 16 saídas digitais, taxa máxima de aquisição de 100k, seqüência de leitura e ganho programáveis, suporte para interrupções, base de tempo interna com 3 contadores/ temporizadores de 16 bits.

Para realizar e gerenciar a leitura e armazenamento dos dados foi desenvolvido programa específico para operar com o conversor A/D. Este programa incorporou subrotinas oferecidas pelo fabricante da placa e, também a sub-rotina Psicro, elaborada por ROCHA et al. (1990), específica para o cálculo das propriedades psicrométricas do ar.

### **5.3.Operacionalização e calibração do módulo experimental**

#### **5.3.1. Calibração dos instrumentos**

A instrumentação foi calibrada a partir de padrões avaliados em cadeia metrológica. Ela foi instalada para a linha de 150 mm, que teve suas condições de operação avaliadas.

Os transdutores de pressão e os termopares utilizam como fonte de referência os Laboratórios de Medidas de Vazão e de Termometria do IPT, que por sua vez estão rastreados a padrões internacionais.

Os termopares foram calibrados em um banho termostático, dois de cada vez, nos próprios laboratórios da EPUSP. O conjunto de termômetros que foi utilizado como padrão, havia sido aferido no IPT, com resultados registrados nos certificados de nº 803.684 a 803.689.



A faixa de temperaturas adotada na calibração foi de 0° C a 50° C, onde foram levantados dados, posteriormente tratados e ajustados por um polinômio de 4° grau. Os resultados da calibração e detalhes do aparato experimental estão na tabela B1 e B2 do anexo B. Os ensaios foram realizados com os medidores de temperatura já associados aos seus cabos de extensão e ao conectados ao computador, como apresentado na figura 40. A mesma configuração foi utilizada posteriormente, evitando que modificações nos equipamentos e processo de medição introduzissem erros.

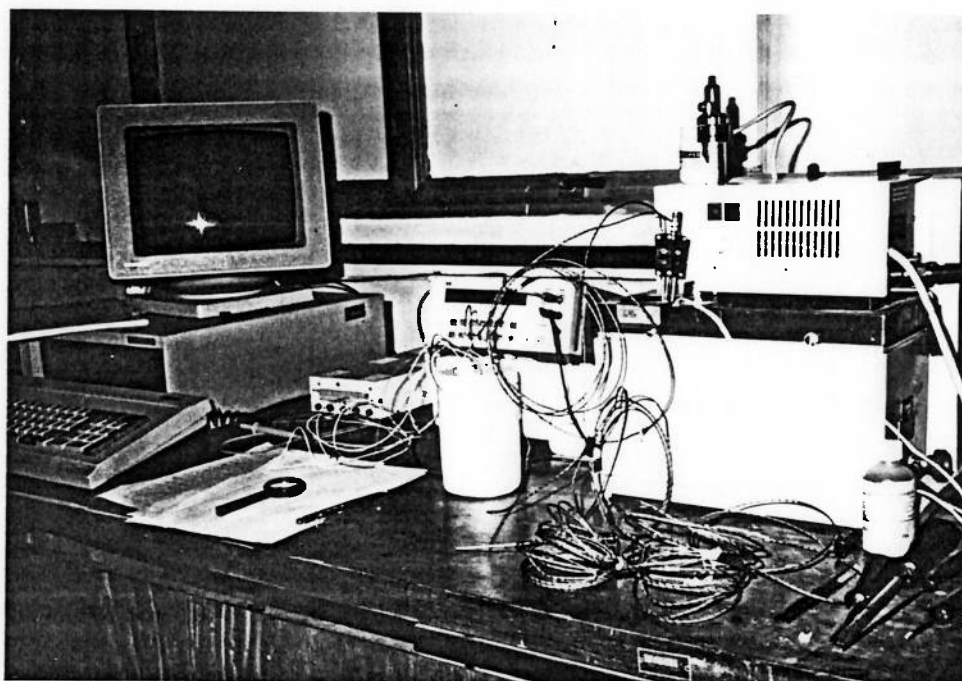


Figura 40 - Aparato experimental para calibração dos termopares

A proposta original previa a utilização de uma junta fria eletrônica como referência. Um termistor do condicionador de sinais teria esta função, porém, considerando as dificuldades encontradas para a calibração deste sensor e o fato de sua localização não garantir que as leituras de temperatura fossem feitas sempre nas mesmas condições, fez-se a opção de utilizar uma junta fria física. Ela era constituída de um recipiente isolado termicamente contendo gelo fundente.

Os transdutores de pressão foram aferidos com o uso de uma fonte de pressão padrão Yokogawa 2656, com fundo de escala de 2500 mm.c.a., no Laboratório de Vazão do IPT. Cada ensaio de transdutor foi realizado utilizando-se 5 pontos divididos uniformemente dentro de sua faixa de medição. Os resultados foram ajustados por regressão linear (coeficientes na tabela B3 do anexo B).

As leituras do barômetro utilizado tiveram suas indicações comparadas com barômetro do Laboratório de Medidas de Vazão do IPT. Sendo este procedimento repetido em dias diferentes de ensaios pode-se estabelecer uma correlação entre as indicações de ambos em determinada faixa de leituras, adotando-se o do IPT como referência.

A placa de orifício foi credenciada como padrão a partir de avaliação dimensional feita no Laboratório de Metrologia do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, utilizando-se de sistema de medição por coordenadas com sensor de esfera de safira e réguas óticas, que possui resolução nas suas leituras de 1 micron, e a incerteza sistemática está em torno de 0,001 mm.

Os resultados obtidos estão na tabela B4 do anexo B. Eles indicam que a placa fabricada obedeceu rigidamente as condições de projeto, com variações nas dimensões da ordem de 0,01 mm, avalizando seu uso como padrão.

### **5.3.2. Ensaio de verificação**

Foram realizados ensaios para verificação operacional e metrológica do módulo, utilizando-se a linha com diâmetro de 150 mm. Nestes ensaios foram avaliados, o funcionamento da instrumentação, vários modos para aquisição de dados, e o perfil de velocidades na seção de testes.



Nos primeiros ensaios, para realizar simultaneamente leituras de pressão de três transdutores, os resultados eram compatíveis apenas para baixas pressões. Após determinado valor, os dados apresentados pelos sensores, passavam a oscilar muito, indicando valores sem significado.

Foram realizadas várias hipóteses e testes concluindo-se pela necessidade de substituição da fonte montada na EPUSP pelo modelo 6200B da Hewlett Packard (HP). Esta fonte possui as seguintes características: opera em larga faixa de voltagem ( 0 a 50 Volts), fornece aos quatro transdutores simultaneamente corrente livre de ruídos que poderiam prejudicar a interpretação do sinal de leitura e possui também ampla capacidade de regulação e estabilidade na voltagem fornecida.

O programa de computador desenvolvido possibilita que o registro seja feito com dois modos de aquisição: um que registra todos os valores de uma amostra de tamanho determinado e outro que armazena valores médios e seus respectivos parâmetros estatísticos, calculados a partir de conjuntos de dados. também de tamanho determinado. Estes modos interferem no tempo que define o período de aquisição. Para o caso do registro de todos os valores, o tempo é menor, e os valores médios das grandezas são calculados posteriormente, enquanto no outro modo os valores adquiridos já são médias representativas de determinado conjunto de dados.

Estas alternativas de aquisição foram testadas e avaliadas para atuarem como filtros para valores indesejáveis causados por ruídos interferentes no processo de medição. Tiveram ,também, a função de garantir que o valor adquirido fosse representativo do valor médio, e que a incerteza associada a ele fosse de pequena ordem.

Os resultados dessas aquisições simuladas foram analisados fazendo-se comparações. Por exemplo entre um único valor médio de pressão, calculado a partir de 1000 dados, e a média de 50 valores médios de pressão

obtidos a partir da coleta de 50 dados cada um. Os valores resultantes foram próximos, sendo que no primeiro caso a incerteza foi menor.

Os conjuntos de dados registrados foram analisados também através de um método estatístico denominado Análise Exploratória, com o objetivo de encontrar registros de valores indesejáveis, típicos de interferências externas, que pudessem distorcer a média. Contudo, esses valores não foram encontrados em nenhum dos processos de aquisição.

Outra avaliação realizada no módulo experimental, foi a medição do perfil de velocidades na seção de testes através do uso de dois tubos de Pitot padrão, com hastes de diâmetros 3,0 mm e 4,8 mm.

Nos primeiros ensaios para levantamento da distribuição de velocidades foi verificada assimetria no perfil resultante. Através de ampla investigação foram repetidos os ensaios, modificando-se alguns elementos e sua localização na linha. Foi avaliada a influência da válvula borboleta, do dispositivo posicionador do Pitot e dos elementos à montante da seção de testes que são principalmente o condicionador de escoamento e o bocal de entrada. Alterações foram providenciadas e os resultados de novas medições apresentaram simetria na distribuição das velocidades, consideradas as incertezas de medição, verificada através de um coeficiente adimensionalizado de velocidade:

$$\frac{v_i}{v_{n+1-i}}$$

onde

$i$  é o número do ponto de medição em que está o tubo de Pitot, e

$n$  é o número total de pontos de medição em um diâmetro

Tabelas e gráficos com os resultados obtidos nas investigações sobre o perfil de velocidades estão apresentados no anexo C .

As incertezas relativas estimadas no cálculo da velocidade determinada através do uso de tubo de Pitot situaram-se em torno de 3%.

## 6. ENSAIOS DOS PROTÓTIPOS

### 6.1. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho propôs que a investigação sobre o desempenho dos medidores de vazão tubo múltifuro fosse realizada experimentalmente através de ensaios de protótipos.

Nestes ensaios foram avaliadas as características construtivas dos protótipos e sua interação com o escoamento através da determinação do comportamento do coeficiente de vazão ( $K$ ) em função do número de Reynolds ( $R$ ).

A determinação dos valores para o coeficiente de vazão ( $K$ ) foi feita comparando-se as vazões medidas pelo múltifuro e por uma placa de orifício, estabelecida como padrão para a determinação do valor da vazão de referência.

Foram estabelecidas as seguintes condições para os ensaios que determinaram as curvas de calibração ( $K \times R$ ):

- perfil de velocidades simétricos na seção de testes
- escoamento em regime permanente
- fluido com propriedades conhecidas na linha de escoamento, no instante em que se realizam as medições

Os resultados experimentais foram ajustados pelo método dos mínimos quadrados, utilizando uma função conveniente. Eles possibilitaram fazer comparações entre protótipos, e com outras referências.

Outras duas investigações foram realizadas. A primeira procurou verificar diferenças que podem ocorrer causadas pela montagem do instrumento na seção de testes, como por exemplo, variações involuntárias no alinhamento do medidor devido a uma nova montagem.

Uma segunda pretendeu avaliar influências causadas por medições realizadas em seção com perfil de velocidades assimétrico. Isto é, verificando qual a diferença entre a vazão medida com o multímetro e a vazão verdadeira, quando utiliza-se no cálculo da vazão do multímetro o valor de  $K$ , previamente determinado em ensaios com perfis de velocidades simétricos.

## **6.2. Arranjo experimental e equipamentos utilizados**

O estabelecimento do arranjo e do procedimento experimental para os ensaios dos protótipos levou em conta testes realizados no módulo experimental, citados no item 5.3.2.. Estes testes consistiram em operacionalizar linha de escoamento de 150 mm, medido as grandezas de interesse e avaliar a faixa de vazões e respectivos  $N^{\circ}$  de Reynolds disponíveis.

O arranjo experimental definido alterou-se da configuração original definida no projeto do módulo experimental nos seguintes componentes:

- conexão da tubulação de 150 mm ao ventilador: o distribuidor convergente foi substituído por um alargamento associado a uma junta de expansão de borracha, que encaixa-se na entrada do ventilador. Esta modificação teve como objetivo reduzir a perda de carga possibilitando aumentar o  $n^{\circ}$  de Reynolds máximo para os ensaios.
- instalação de uma tela junto ao bocal, na entrada da tubulação. Tem como objetivo garantir as condições de simetria do perfil de velocidades na seção de testes.

Foram empregados três arranjos do aparato experimental nos ensaios.

O primeiro foi estabelecido com as alterações descritas acima, e possui disposição dos equipamentos conforme pode ser visto nas figuras 41 e 42.

O segundo arranjo é idêntico ao primeiro a menos da tela do bocal de entrada e da válvula borboleta, que foram retiradas, com o objetivo de atingir a

vazão máxima da bancada. Estes dois arranjos receberam a denominação **MV 2.2**, onde o ensaio de vazão máxima é caracterizada pelos de nº 11, de cada protótipo.

O terceiro arranjo, denominado **MV 2.3**, usou duas grades com furos quadrados sobrepostas e colocadas no lugar da tela, de modo a obstruir parcialmente a entrada da linha de escoamento, no lugar da tela, gerando um perfil assimétrico de velocidades. Resultados do levantamento destes perfis podem ser encontrados no anexo C

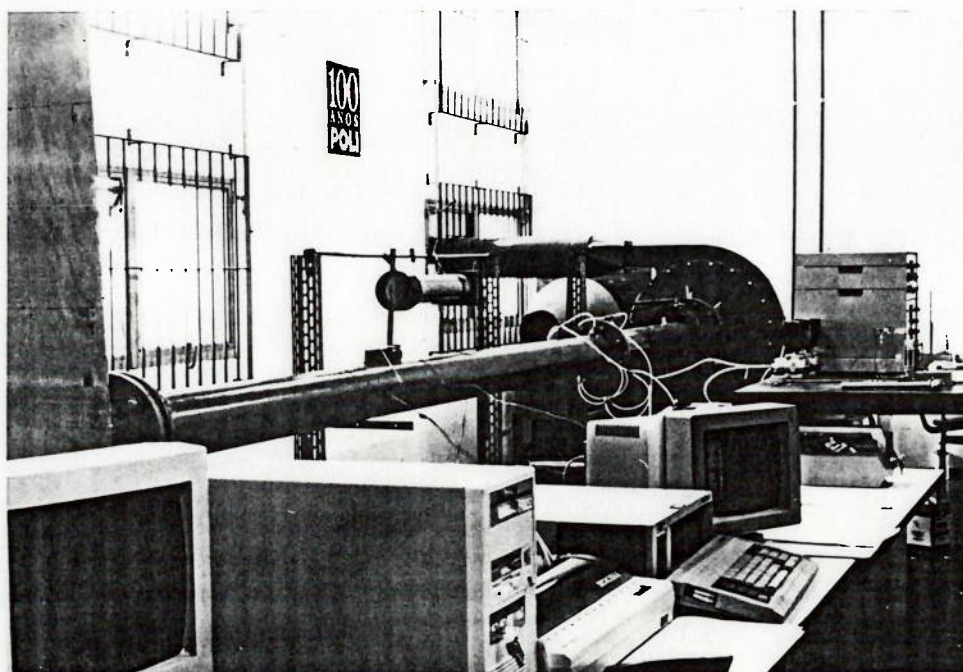
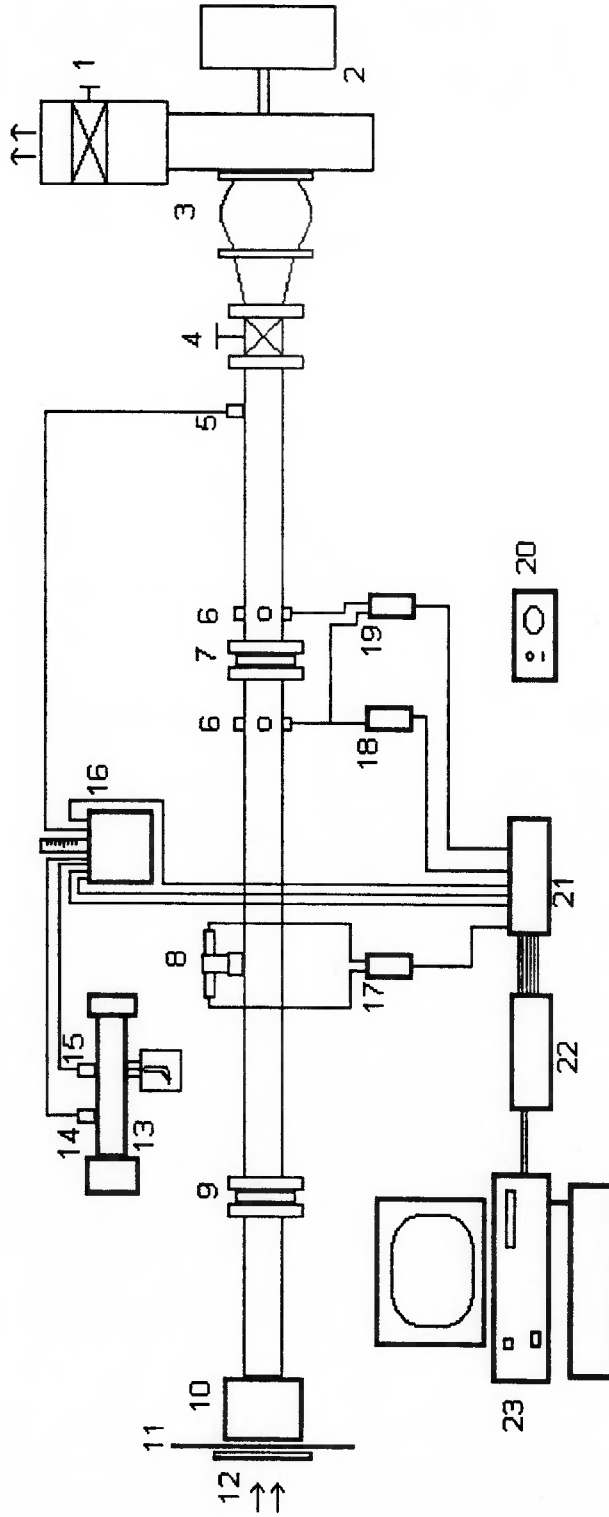


Figura 41 - Vista geral do aparato experimental

As dimensões de trechos retos entre seções, definidas para a linha de 150 mm, respeitaram os valores mínimos indicados nas referências, e foram apresentadas na figura 34 do capítulo 5. O diâmetro interno da tubulação foi medido com paquímetro, em oito posições diferentes, apresentando o valor médio de 155,4 mm.

# ARRANJO EXPERIMENTAL

Configuração: MV 2.2



## Legenda:

- |                                   |                                       |
|-----------------------------------|---------------------------------------|
| 1 - Válvula borboleta (descarga)  | 17 - Transdutor nº 1 ou nº2 (DPmult.) |
| 2 - Conjunto moto-ventilador      | 18 - Transdutor nº 3 (Pestática)      |
| 3 - Junta de expansão de borracha | 19 - Transdutor nº 4 (DPplaca)        |
| 4 - Válvula borboleta (sucção)    | 20 - Fonte DC para transdutores       |
| 5 - Termopar nº 4 (temp. ar duto) | 21 - Condicionador de sinal           |
| 6 - Tomadas de pressão estática   | 22 - Conversor A/D                    |
| 7 - Placa de orifício             | 23 - Microcomputador PC               |
| 8 - Medidor de vazão multifuros   |                                       |
| 9 - Condicionador de escoamento   |                                       |
| 10 - Bocal                        |                                       |
| 11 - Anteparo                     |                                       |
| 12 - Tela                         |                                       |
| 13 - Psicrômetro                  |                                       |
| 14 - Termopar nº 1 (TBS)          |                                       |
| 15 - Termopar nº 2 (TBU)          |                                       |
| 16 - Junta fria (gelo 0° C)       |                                       |

Figura 42 - Esquema do arranjo experimental

Para as medidas de pressão diferencial nos multífuros foram utilizados dois transdutores, com diferentes faixas de operação, denominados por nº 1 e nº 2. Foi selecionado o mais adequado para cada ensaio.

Na placa de orifício foram utilizados outros dois transdutores de pressão, também com faixas de operação distintas, chamados de nº 3 e nº 4, sendo que a pressão diferencial foi avaliada pelo nº 4, e a pressão estática à montante da placa, pelo nº 3.

A fonte de alimentação de corrente contínua (DC), para os transdutores de pressão usada foi a modelo 6200B da HP.

As temperaturas foram lidas pelos termopares tipo J, que foram numerados de 1 a 4, e que tiveram a seguinte disposição no arranjo experimental:

- termopar nº 1: temperatura de bulbo seco (TBS)
- termopar nº 2: temperatura de bulbo úmido (TBU)
- termopar nº 3: reserva - desligado (T3)
- termopar nº 4: temperatura do ar dentro da tubulação (T4)

Em todos os ensaios foi utilizada uma junta fria com referência física. Estas extremidades dos termopares ficaram imersas em um tubo de ensaio contendo mercúrio que estavam dentro de um recipiente de material isolante térmico, que continha mistura água-gêlo mantida a 0° C. Para fins de verificação, um termômetro aferido acompanhava a temperatura da mistura durante as medições.

O computador utilizado na aquisição de dados, onde estavam acopladas as placas conversora A/D e a condicionadora de sinal, era um PC modelo XT, operando em 8 MHz, com disco rígido de 20 Mbytes de capacidade.



As incertezas sistemáticas adotadas para os instrumentos e a faixa de operação para a qual foram calibrados estão apresentadas na tabela 5 que segue:

GRANDEZA	INSTRUMENTO	FAIXA DE OPERAÇÃO	INCERTEZA SISTEMÁTICA
Pressão diferencial Multifuros	Transdutor nº 1	0 a 1490 Pa (0 A 152 mm.c.a.)	± 0,75%
Pressão diferencial Multifuros	Transdutor nº 2	0 a 7474 Pa (0 a 762 mm.c.a.)	± 0,5%
Pressão estática Placa de orifício	Transdutor nº 3	0 a 7474 Pa (0 a 762 mm.c.a.)	± 0,5%
Pressão diferencial Placa de orifício	Transdutor nº 4	0 a 37368 Pa (0 a 3810 mm.c.a.)	± 0,5%
Pressão atmosférica	Barômetro	-----	± 0,5%
Temperatura - TBS	Termopar J nº 1	0 a 50° C	0,75%
Temperatura - TBU	Termopar J nº 2	0 a 50° C	0,75%
Temperatura do ar - T4	Termopar J nº 4	0 a 50° C	0,75%

Tabela 5 - Incertezas sistemáticas e faixa de operação da instrumentação

A verificação do perfil de velocidades foi feita com um tubo de Pitot fabricado em conformidade com o proposto nas referências AMCA/ASHRAE, já citadas, que possui diâmetro da sua haste igual a 4,8 mm. Foi posicionado através de dispositivo próprio para sua fixação na mesma seção de teste onde protótipos de medidores multifuros foram ensaiados.



### 6.3. Procedimento experimental

A faixa de vazão e de nº de Reynolds para a realização dos ensaios foi definida a partir dos testes preliminares da bancada e das possibilidades de aplicação do medidor multifuro descritos na introdução deste trabalho. Concluiu-se pelos valores de Reynolds entre 30.000 e 300.000. Neste intervalo foram estabelecidas onze condições de ensaio para os protótipos, conforme apresentado na tabela 6, com a respectiva estimativa de valores aproximados de vazão e de pressão diferencial na placa de orifício.

ENSAIO Nº	REYNOLDS	VAZÃO (m <sup>3</sup> /s)	DP <sub>placa</sub> (mm.c.a.) <sup>6</sup>
1	3,0 x 10 <sup>4</sup>	0,066	8
2	4,0 x 10 <sup>4</sup>	0,088	16
3	5,0 x 10 <sup>4</sup>	0,110	23
4	6,0 x 10 <sup>4</sup>	0,132	34
5	8,0 x 10 <sup>4</sup>	0,176	60
6	1,0 x 10 <sup>5</sup>	0,220	95
7	1,5 x 10 <sup>5</sup>	0,330	215
8	2,0 x 10 <sup>5</sup>	0,439	381
9	2,5 x 10 <sup>5</sup>	0,549	596
10	2,9 x 10 <sup>5</sup>	0,490	770
11 (max)	3,0 x 10 <sup>5</sup>	0,650	840

Tabela 6 - Definição das condições dos ensaios para os multifuros

<sup>6</sup> As unidades da pressão diferencial na placa de orifício foram adotadas em mm.c.a., porque estes valores, que serviram como referência para estabelecer a condição de ensaio, eram apresentados na tela do computador nesta unidade.

Foram realizadas avaliações do perfil de velocidades na seção de testes com tubo de Pitot, para os três arranjos experimentais adotados nos ensaios. Este procedimento foi realizado para as diferentes condições de vazão.

Ao iniciar cada ensaio eram verificadas a estabilidade dos valores das temperaturas que determinaram as propriedades físicas do ar, e o zero nas leituras nos transdutores de pressão, antes de iniciar o movimento do ar.

O protótipo a ser ensaiado era montado com seus acessórios e verificada a estanqueidade nos tubos e câmaras que transmitiam as pressões. Em seguida eram traçadas duas retas de referência na sua parte superior, que indicavam a direção onde estavam localizados os orifícios de montante e de jusante. Através destas referências, os multífuros, após serem inseridos na tubulação, eram posicionados procurando o alinhamento com a direção da tubulação. A garantia de fixação centralizada no adaptador era dada por um perfeito assentamento da anilha forçada pelo aperto da porca. Um protótipo montado pode ser visto na figura 43.

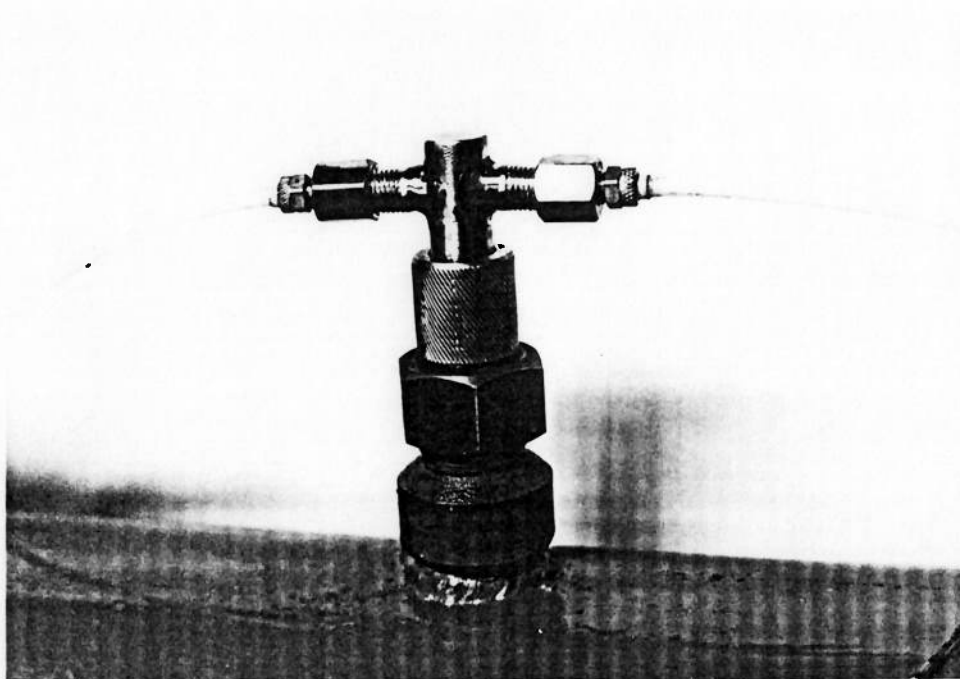


Figura 43 - Protótipo montado na seção de testes

Partia-se o ventilador, sempre com a(s) válvula fechada(s), e em seguida operava-se a(s) válvula(s) no processo de busca das pressões diferenciais para a placa de orifício correspondente aos valores de Reynolds pré estabelecidos.

As leituras dos instrumentos eram realizadas através do computador, e apresentadas na tela. O programa desenvolvido, denominado CENTRAL, permitia que para cada ensaio fosse estabelecido a quantidade de valores que seriam aquiridos nos instrumentos calculando durante a aquisição o valor médio e o intervalo de confiança com probabilidade de 95% de cada grandeza medida. Poderia ser definido o número de valores médios que seriam registrados em um arquivo durante o processo de aquisição, com suas respectivas incertezas.

Após todos os testes realizados neste sistema de tomada de dados, descritos no capítulo anterior, optou-se por ter um grande número de dados aquiridos para calcular a média de cada uma das grandezas, reduzindo assim a influência de erros aleatórios. Definiu-se pela aquisição de 1000 valores em cada ensaio, e o registro de uma única média destes valores e suas respectivas incertezas. Estando acoplado ao programa de aquisição a subrotina para os cálculos psicrométricos - PSICRO, os valores das propriedades do ar eram calculadas e registradas no mesmo arquivo.

Definida uma posição para a válvula de controle, acompanhava-se na tela do computador a apresentação de médias de 1000 valores para cada uma das grandezas, até que estas apresentassem estabilidade desejada. Nesse instante, emitia-se um comando para que o computador registrasse um conjunto de dados num arquivo.

Alterando-se a posição da válvula, buscava-se uma nova condição de interesse, dentre aquelas estabelecidas na tabela 6, onde repetia-se o processo de aquisição.

Para cada um dos protótipos foram realizados ao menos dez ensaios. Sendo que para a maior parte deles foi realizado o 11º ensaio, com vazão máxima. Entendeu-se desnecessário realizar este último ensaio para todos os protótipos, pois a diferença dos valores de Reynolds entre os ensaios de nº 10 e nº 11, foi pequena.

Foram também realizados ensaios para verificar os efeitos que podem ocorrer na instalação de um determinado protótipo, devido a desalinhamentos. Para tanto, foi selecionado um protótipo, o 4B, para o qual foram realizados três conjuntos de ensaios em condições semelhantes, sendo o protótipo remontado e reinstalado antes de cada conjunto de ensaios.

Na condição denominada MV 2.3 para o aparato experimental, foram testados alguns dos protótipos, medindo vazão onde o perfil de velocidades era assimétrico. Os protótipos selecionados foram: 1A, 1B, 2E, 3B, 4A e 4B. Nestes testes, as condições do escoamento foram as mesmas estabelecidas para os ensaios de nº 5, 6, 8 e 10, apresentados na tabela 6.

Foi, ainda, ensaiado um medidor Anubar, nas mesmas condições dos protótipos, com perfis de velocidades simétrico e assimétrico.

#### **6.4. Procedimentos para o tratamento dos dados**

Os arquivos de dados de ensaios para um mesmo protótipo, foram agrupados em um único conjunto de dados através do programa AGRUPA.

Em seguida era utilizado outro programa, o PLINCERT, que a partir do arquivo de dados, realizava os cálculos de vazão em volume ( $Q_{placa}$ ) nas condições de pressão e temperatura do escoamento, a velocidade média no conduto ( $V_{tub}$ ), a viscosidade dinâmica do ar, o número de Reynolds ( $R$ ) e o coeficiente de vazão ( $K$ ) para o múltifuro no ensaio. Todos os valores foram apresentados em uma tabela final acompanhados de suas respectivas

incertezas combinadas. A viscosidade do ar foi calculada em função da temperatura, através de uma regressão linear.

Os valores das incertezas sistemáticas necessários para os cálculos fazem parte do programa. O equacionamento empregado no cálculo das incertezas foi desenvolvido para cada uma das grandezas e está apresentado no anexo D.

Os programas de computador foram desenvolvidos utilizando-se a linguagem Turbo Pascal. Listagens dos mesmos estão disponíveis no apêndice I.

Os arquivos de resultados foram importados através do aplicativo LOTUS 123 e transformados em uma planilha de cálculo, onde receberam formatação adequada. Nesta formatação foram obedecidas as regras que estabelecem o número de algarismos significativos para representar cada valor calculado e sua respectiva incerteza, conforme proposto por HELENE; VANIN (1981). Nestas planilhas foram realizados cálculos complementares.

Em cada conjunto de dados, para os valores do N<sup>o</sup> de Reynolds e do Coeficiente de Vazão foi ajustada uma curva conveniente, através do programa STATGRAPH, versão 2.6.

### 6.5. Principais equações utilizadas para os cálculos dos resultados

Para o cálculo da vazão em volume medida com a placa de orifício foram utilizadas as equações propostas pela norma ISO 5167 (1971) apresentadas a seguir.

$$Q_{\text{placa}} = \varepsilon_1 \frac{C_d}{\sqrt{1-\beta^4}} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2 DP_{\text{placa}}}{\rho_1}} \quad (6.1)$$

sendo o coeficiente de compressibilidade dado por:

$$\varepsilon_1 = 1 - (0.41 + 0.35\beta^4) \frac{DP_{placa}}{1.4 P_1} \quad (6.2)$$

e o coeficiente de descarga ( $C_d$ ) calculado através de uma rotina iterativa do programa utilizando a equação de Stolz :

$$C = 0.5959 + 0.0312 \beta^{2.1} - 0.1840 \beta^8 + 0.0029 \beta^{2.5} \left( \frac{10^6}{R_D} \right)^{0.75} + 0.0390 \beta^4 (1 - \beta^4)^{-1} - 0.015839 \beta^3 \quad (6.3)$$

onde  $\beta = d/D$

e  $R_D$  é o número de Reynolds em função do diâmetro do conduto (D)

No cálculo do coeficiente de vazão do multífuos foi empregada a equação:

$$K = \frac{4Q_{placa}}{\pi D^2 \sqrt{\frac{2 DP_{mult}}{\rho}}} \quad (6.4)$$

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Coeficiente de vazão em função de Reynolds

Os resultados dos ensaios realizados para cada protótipo, com perfil de velocidades simétrico, estão apresentados nas tabelas numeradas de 7 a 20. Para o medidor Annubar, identificado pelo seu modelo ANR 75, os resultados estão na tabela 21. Estes ensaios cobrem a faixa de Reynolds de 30.000 a 300.000.

Nas tabelas estão os valores das principais grandezas envolvidas nos testes, acompanhados de suas respectivas incertezas combinadas, calculadas conforme apresentado no anexo D.

Para cada conjunto de valores do coeficiente de vazão (K) e do número de Reynolds (R), foi feito o melhor ajuste possível, através de funções convenientes usando o método dos mínimos quadrados. Este tratamento numérico foi implementado com o emprego do programa STATGRAPH.

O tratamento foi aplicado para o conjunto total dos dados, e também para o subconjunto definidos para R entre 100.000 e 300.000. Esta partição é interessante por dois motivos: permitir comparações com resultados de outros estudos, e avaliar o comportamento do protótipo para aplicações específicas, onde as condições do escoamento estão dentro do intervalo.

Verificou-se que para os dois grupos de dados, dois tipos de curva apresentavam bons ajustes:

- regressão linear:  $K = a + b.R$
- regressão por uma função tipo potência:  $K = a.R^b$

A partir dos valores do coeficiente de correlação e da incerteza obtidos para as regressões em cada caso foi selecionada a função adequada. O nível de confiança estabelecido para a regressão foi de 95%.

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTÓTIPO MODELO:** 1A  
**Perfil externo:** Circular  
**Arranjo Interno:** 01 interpolador de 6.4 mm  
**Nº de orifícios a jusante:** 01  
**Arranjo Experimental:** MV 2.2  
**Fluido:** Ar  
**Padrao:** Placa de orifício  
**Nº de dados para cálculo de médias:** 1000  
**Observação:** medicao 12124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)		DPmult± Inc. (Pa)		P1(abs)± Inc. (kPa)		T4± Inc. (°C)		Pb± Inc. (kPa)		M.Esp± Inc. (kg/m3)		Qplaca± Inc. (m3/s)		Vtub± Inc. (m/s)		Rey± Inc.		K ± Inc.	
1	82	2	22.6	0.2	93.9	1.2	26.4	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.0663	0.0013	3.50	0.07	3.17E+04	1E+03	0.540	0.013
2	154	2	40.2	0.3	93.7	1.0	28.2	0.2	93.8	0.7	1.07	0.03	0.0904	0.0013	4.77	0.08	4.27E+04	1.3E+03	0.550	0.011
3	236	2	57.9	0.4	93.8	0.9	26.4	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1113	0.0016	5.87	0.10	5.32E+04	1.6E+03	0.567	0.012
4	328	3	78.0	0.6	93.8	0.9	26.4	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1311	0.0019	6.92	0.11	6.26E+04	1.8E+03	0.575	0.012
5	598	4	138.4	1.0	93.7	0.8	26.4	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1763	0.0025	9.30	0.15	8.42E+04	2.5E+03	0.580	0.012
6	942	5	209.2	1.6	93.6	0.8	26.4	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.221	0.003	11.64	0.19	1.05E+05	3E+03	0.591	0.012
7	2039	10	409	3	93.3	0.8	26.4	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.323	0.005	17.02	0.27	1.54E+05	5E+03	0.618	0.013
8	3767	19	719	5	92.9	0.8	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.435	0.006	23.0	0.4	2.08E+05	6E+03	0.628	0.013
9	5865	29	1093	8	92.3	0.8	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.538	0.008	28.4	0.5	2.57E+05	8E+03	0.631	0.013
10	7573	38	1380	10	91.9	0.8	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.607	0.009	32.1	0.5	2.90E+05	9E+03	0.633	0.013
11	8209	41	1448	7	91.9	0.8	29.3	0.2	93.8	0.7	1.07	0.03	0.634	0.009	33.5	0.6	2.98E+05	9E+03	0.642	0.013

**LEGENDA:**  
 DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orificio, multifuros)  
 P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orificio  
 T4 = Temperatura do ar no duto  
 Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)  
 M Esp. = Massa específica do ar  
 Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orificio  
 Vtub = Velocidade média na tubulacao com diâmetro D  
 Rey = N° de Reynolds em funcao do diâmetro D  
 K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros  
 Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 7 - Resultados dos ensaios - protótipo 1A



## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTÓTIPO MODELO: 1B**

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: Medição 05124

Ensaio Nº	DPplaca ± Inc. (Pa)		DPmult ± Inc. (Pa)		P1(abs) ± Inc. (kPa)		T4 ± Inc. (°C)		Pb ± Inc. (kPa)		M.Esp ± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )		Qplaca ± Inc. (m <sup>3</sup> /s)		Vtub ± Inc. (m/s)		Rey ± Inc.		K ± Inc.	
1	85	2	22.9	0.2	93.3	1.2	28.3	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	0.0675	0.0011	3.56	0.06	3.18E+04	1E+03	0.544	0.012
2	139	2	34.9	0.3	93.3	1.0	28.5	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	0.0861	0.0013	4.54	0.08	4.05E+04	1.2E+03	0.562	0.012
3	234	2	56.8	0.4	93.3	0.9	28.6	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	0.1115	0.0016	5.88	0.10	5.24E+04	1.6E+03	0.570	0.012
4	333	2	78.0	0.6	93.3	0.9	28.7	0.2	93.4	0.7	1.06	0.03	0.1327	0.0019	7.00	0.11	6.23E+04	1.8E+03	0.579	0.012
5	563	4	128.2	1.0	93.2	0.8	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	0.1721	0.0024	9.08	0.15	8.07E+04	2.4E+03	0.585	0.012
6	944	5	206.6	1.6	93.1	0.8	28.8	0.2	93.4	0.7	1.06	0.03	0.2222	0.0031	11.72	0.19	1.04E+05	3.1E+03	0.595	0.012
7	2020	10	409	3	92.8	0.8	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	0.323	0.005	17.04	0.27	1.52E+05	4E+03	0.615	0.012
8	3781	19	719	5	92.3	0.8	29.0	0.2	93.4	0.7	1.06	0.03	0.439	0.006	23.2	0.4	2.05E+05	6E+03	0.630	0.013
9	5893	30	1100	8	91.8	0.8	28.9	0.2	93.4	0.7	1.06	0.03	0.543	0.008	28.6	0.5	2.54E+05	8E+03	0.630	0.013
10	7565	38	1379	10	91.4	0.8	28.9	0.2	93.4	0.7	1.06	0.03	0.611	0.009	32.2	0.5	2.86E+05	8E+03	0.633	0.013
11	8208	41	1453	7	91.9	0.8	29.7	0.2	93.8	0.7	1.06	0.03	0.635	0.009	33.5	0.6	2.97E+05	9E+03	0.641	0.013

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazão em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

**Tabela 8 - Resultados dos ensaios - protótipo 1B**

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTÓTIPO MODELO: 2A**

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora s/ interpolador

Nº de orifícios a jusante: 1

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.
1	80	2	93.3	28.8	93.4	1.06	0.0658	3.47	3.09E+04	0.522
2	147	2	93.3	28.9	93.4	1.06	0.0886	4.67	4.15E+04	0.546
3	227	2	93.3	28.9	93.4	1.06	0.1100	5.80	5.16E+04	0.560
4	342	3	93.3	28.9	93.4	1.06	0.1347	7.11	6.31E+04	0.566
5	624	4	93.2	28.9	93.4	1.06	0.1811	9.56	8.48E+04	0.576
6	945	5	93.1	28.9	93.4	1.06	0.223	11.74	1.04E+05	0.582
7	2069	11	92.8	28.9	93.4	1.06	0.327	17.25	1.53E+05	0.596
8	3727	19	92.3	29.0	93.4	1.06	0.436	23.0	2.04E+05	0.607
9	5855	29	91.8	28.9	93.4	1.06	0.542	28.6	2.54E+05	0.616
10	7548	38	91.4	28.8	93.4	1.06	0.611	32.2	2.86E+05	0.621
11	8256	41	91.9	29.2	93.8	1.07	0.636	33.5	2.99E+05	0.632

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazão em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 9 - Resultados dos ensaios - protótipo 2A

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTÓTIPO MODELO: 2B

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora + 01 tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.																
1	83	2	22.7	0.2	93.3	1.2	93.3	0.2	28.6	0.2	93.3	1.0	0.3	93.4	0.7	1.07	0.03	0.0670	0.0011	3.53	0.06	3.15E+04	1E+03	0.541	0.012	
2	157	2	41.0	0.3	93.3	1.0	93.3	0.2	28.7	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.0917	0.0013	4.84	0.08	4.31E+04	1.3E+03	0.551	0.011
3	239	2	59.7	0.5	93.3	0.9	93.3	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.1126	0.0016	5.94	0.10	5.29E+04	1.6E+03	0.562	0.012
4	326	2	79.0	0.6	93.3	0.9	93.3	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.1313	0.0018	6.93	0.11	6.16E+04	1.8E+03	0.569	0.012
5	629	4	146.5	1.1	93.2	0.8	93.2	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.1817	0.0025	9.58	0.15	8.53E+04	2.5E+03	0.578	0.012
6	942	5	218.3	1.6	93.1	0.8	93.1	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.222	0.003	11.71	0.19	1.04E+05	3E+03	0.578	0.012
7	2098	11	464	4	92.8	0.8	92.8	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.329	0.005	17.36	0.28	1.54E+05	5E+03	0.588	0.012
8	3788	19	774	6	92.3	0.8	92.3	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.439	0.006	23.2	0.4	2.06E+05	6E+03	0.607	0.012
9	5892	30	1148	9	91.8	0.8	91.8	0.2	28.8	0.2	93.4	0.7	1.06	0.03	93.4	0.7	1.06	0.03	0.543	0.008	28.6	0.5	2.55E+05	8E+03	0.616	0.013
10	7562	38	1445	11	91.4	0.8	91.4	0.2	28.7	0.2	93.4	0.7	1.07	0.03	93.4	0.7	1.07	0.03	0.610	0.009	32.2	0.5	2.87E+05	9E+03	0.618	0.013
11	8273	41	1549	8	91.9	0.8	91.9	0.2	29.1	0.2	93.8	0.7	1.07	0.03	93.8	0.7	1.07	0.03	0.636	0.009	33.6	0.6	2.99E+05	9E+03	0.623	0.013

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazão em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 10 - Resultados dos ensaios - protótipo 2B

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTÓTIPO MODELO: 2C

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: somente régua divisora

Nº de orifícios a jusante: 04

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 14124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m³)	Qplaca± Inc. (m³/s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.						
1	79	1	24.4	0.2	93.5	0.7	1.07	0.02	0.0011	3.44	0.06	3.06E+04	9E+02	0.508	0.011	
2	147	2	39.3	0.3	93.5	0.7	1.07	0.03	0.0885	0.0013	4.67	0.08	4.16E+04	1.2E+03	0.544	0.011
3	239	2	59.4	0.4	93.5	0.7	1.07	0.03	0.1126	0.0016	5.94	0.10	5.29E+04	1.6E+03	0.553	0.012
4	323	2	79.2	0.6	93.5	0.7	1.07	0.03	0.1308	0.0018	6.90	0.11	6.14E+04	1.8E+03	0.565	0.012
5	611	3	144.3	1.1	93.5	0.7	1.07	0.03	0.1792	0.0025	9.45	0.15	8.40E+04	2.5E+03	0.574	0.012
6	962	5	223.8	1.7	93.5	0.7	1.07	0.03	0.224	0.003	11.82	0.19	1.05E+05	3E+03	0.577	0.012
7	2108	11	465	4	93.5	0.7	1.07	0.03	0.330	0.005	17.39	0.28	1.55E+05	5E+03	0.589	0.012
8	3762	19	781	6	93.5	0.7	1.07	0.03	0.437	0.006	23.1	0.4	2.05E+05	6E+03	0.603	0.012
9	5906	30	1190	9	93.5	0.7	1.07	0.03	0.543	0.008	28.6	0.5	2.55E+05	8E+03	0.606	0.012
10	7565	38	1471	7	93.5	0.7	1.07	0.03	0.610	0.009	32.2	0.5	2.87E+05	9E+03	0.613	0.012

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 11 - Resultados dos ensaios - protótipo 2C

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTÓTIPO MODELO:** 2D

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora + 01 tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 4

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 28124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Viub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.
1	80 1	23.3 0.2	93.9 1.3	27.4 0.2	93.9 0.7	1.08 0.03	0.0652 0.0011	3.44 0.06	3.10E+04 1E+03	0.523 0.012
2	157 2	42.0 0.3	93.8 1.0	27.5 0.2	93.9 0.7	1.08 0.03	0.0913 0.0014	4.82 0.08	4.34E+04 1.3E+03	0.545 0.012
3	244 2	62.6 0.5	93.8 0.9	27.5 0.2	93.9 0.7	1.08 0.03	0.1133 0.0016	5.98 0.10	5.39E+04 1.6E+03	0.554 0.011
4	331 2	83.1 0.6	93.8 0.9	27.5 0.2	93.9 0.7	1.08 0.03	0.1318 0.0019	6.95 0.11	6.26E+04 1.8E+03	0.559 0.011
5	600 4	143.3 1.1	93.7 0.8	27.4 0.2	93.9 0.7	1.07 0.03	0.1768 0.0025	9.33 0.15	8.40E+04 2.5E+03	0.571 0.012
6	927 5	218.3 1.6	93.6 0.8	27.6 0.2	93.9 0.7	1.08 0.03	0.219 0.003	11.56 0.19	1.04E+05 3E+03	0.574 0.012
7	2100 11	469 4	93.3 0.8	27.7 0.2	93.9 0.7	1.07 0.03	0.328 0.005	17.29 0.28	1.56E+05 5E+03	0.585 0.012
8	3734 19	801 6	92.9 0.8	27.7 0.2	93.9 0.7	1.07 0.03	0.434 0.006	22.9 0.4	2.06E+05 6E+03	0.593 0.012
9	5859 29	1188 9	92.3 0.8	27.6 0.2	93.9 0.7	1.07 0.03	0.539 0.008	28.4 0.5	2.56E+05 8E+03	0.605 0.012
10	7633 38	1503 8	91.8 0.8	27.5 0.2	93.9 0.7	1.07 0.03	0.611 0.009	32.2 0.5	2.90E+05 9E+03	0.609 0.012

### LEGENDA:

DPplaca,multi. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício

Viub = Velocidade média na tubulacao com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em funcao do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 12 - Resultados dos ensaios - protótipo 2D

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: 2E

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora+02 tubos interpoladores

Nº de orifícios a jusante: 4

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 2B124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmulti± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m³)	Qplaca± Inc. (m³/s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.						
1	78	2	24.1	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.0645	0.0013	3.41	0.07	3.08E+04	1E+03	0.510	0.013
2	155	2	42.8	0.3	93.8	1.0	1.08	0.03	0.0906	0.0013	4.78	0.08	4.31E+04	1.3E+03	0.536	0.011
3	230	2	59.2	0.4	93.8	0.9	1.08	0.03	0.1100	0.0016	5.81	0.09	5.24E+04	1.5E+03	0.554	0.011
4	337	2	83.1	0.6	93.8	0.9	1.08	0.03	0.1329	0.0019	7.01	0.11	6.32E+04	1.9E+03	0.564	0.012
5	608	3	145.2	1.1	93.7	0.8	1.08	0.03	0.1778	0.0025	9.38	0.15	8.46E+04	2.5E+03	0.571	0.012
6	926	5	217.0	1.6	93.6	0.8	1.08	0.03	0.219	0.003	11.55	0.19	1.04E+05	3E+03	0.575	0.012
7	2107	11	471	4	93.3	0.8	1.08	0.03	0.328	0.005	17.31	0.28	1.56E+05	5E+03	0.585	0.012
8	3809	19	813	6	92.8	0.8	1.08	0.03	0.438	0.006	23.1	0.4	2.08E+05	6E+03	0.594	0.012
9	5846	29	1202	9	92.3	0.8	1.08	0.03	0.538	0.008	28.4	0.5	2.56E+05	8E+03	0.600	0.012
10	7639	38	1520	8	91.9	0.8	1.08	0.03	0.610	0.009	32.2	0.5	2.90E+05	9E+03	0.606	0.012

### LEGENDA:

DPplaca,multi. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 13 - Resultados dos ensaios - protótipo 2E

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: 3A

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: 01 tubo interpolador de 6,4 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 09124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.						
1	86	2	28.7	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.0674	0.0013	3.55	0.07	3.26E+04	1E+03	0.490	0.012
2	163	2	48.3	0.4	93.8	1.0	1.09	0.03	0.0922	0.0014	4.86	0.08	4.46E+04	1.3E+03	0.516	0.011
3	246	2	70.0	0.5	93.8	0.9	1.09	0.03	0.1131	0.0016	5.97	0.10	5.46E+04	1.6E+03	0.525	0.011
4	320	3	90.0	0.7	93.8	0.9	1.09	0.03	0.1288	0.0018	6.80	0.11	6.22E+04	1.8E+03	0.528	0.011
5	619	4	163.8	1.2	93.7	0.8	1.09	0.03	0.1786	0.0025	9.42	0.15	8.63E+04	2.5E+03	0.542	0.011
6	952	5	246.6	1.9	93.6	0.8	1.09	0.03	0.221	0.003	11.65	0.19	1.07E+05	3E+03	0.547	0.011
7	2103	11	528	4	93.3	0.8	1.09	0.03	0.326	0.005	17.22	0.28	1.57E+05	5E+03	0.552	0.011
8	3753	19	924	7	92.8	0.8	1.08	0.03	0.433	0.006	22.8	0.4	2.09E+05	6E+03	0.553	0.011
9	5792	29	1385	10	92.2	0.8	1.09	0.03	0.533	0.008	28.1	0.5	2.57E+05	8E+03	0.557	0.011
10	7667	38	1803	9	91.7	0.8	1.09	0.03	0.608	0.009	32.1	0.5	2.94E+05	9E+03	0.557	0.011
11	8149	41	1835	9	91.8	0.8	1.07	0.03	0.632	0.009	33.3	0.6	2.96E+05	9E+03	0.568	0.012

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazão em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 14 - Resultados dos ensaios - protótipo 3A

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: 3B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 12124

Ensaio Nº	DPplaca ± Inc. (Pa)		DPmult ± Inc. (Pa)		P1(abs) ± Inc. (kPa)		T4 ± Inc. (°C)		Pb ± Inc. (kPa)		M.Esp ± Inc. (kg/m³)		Qplaca ± Inc. (m³/s)		Vtub ± Inc. (m/s)		Rey ± Inc.		K ± Inc.	
1	77	2	25.5	0.2	93.9	1.3	26.0	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.0538	0.0013	3.37	0.07	3.06E+04	1E+03	0.491	0.012
2	149	2	43.4	0.3	93.8	1.0	26.1	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.0885	0.0013	4.67	0.08	4.24E+04	1.3E+03	0.521	0.011
3	240	2	66.9	0.5	93.8	0.9	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1121	0.0016	5.91	0.10	5.36E+04	1.6E+03	0.531	0.011
4	314	3	86.8	0.7	93.8	0.9	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1280	0.0018	6.76	0.11	6.13E+04	1.8E+03	0.533	0.011
5	600	4	158.1	1.2	93.7	0.8	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1764	0.0025	9.31	0.15	8.45E+04	2.5E+03	0.544	0.011
6	939	5	244.8	1.8	93.6	0.8	26.3	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.220	0.003	11.61	0.19	1.05E+05	3E+03	0.545	0.011
7	2087	11	524	4	93.3	0.8	26.6	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.326	0.005	17.21	0.28	1.56E+05	5E+03	0.552	0.011
8	3741	19	911	7	92.8	0.8	26.5	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.433	0.006	22.9	0.4	2.07E+05	6E+03	0.556	0.011
9	5820	29	1397	11	92.2	0.8	26.5	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.536	0.008	28.3	0.5	2.56E+05	8E+03	0.556	0.011
10	7591	38	1758	9	91.8	0.8	26.5	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.608	0.009	32.1	0.5	2.91E+05	9E+03	0.562	0.011
11	8125	41	1902	10	91.8	0.8	29.7	0.2	93.8	0.7	1.07	0.03	0.632	0.009	33.3	0.6	2.96E+05	9E+03	0.557	0.011

LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifueros)  
 P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício  
 T4 = Temperatura do ar no duto  
 Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)  
 M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício  
 Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D  
 Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D  
 K = Coeficiente de vazao para o medidor multifueros  
 Inc. = Incerteza global associada 'a cada grandeza

Tabela 15 - Resultados dos ensaios - protótipo 3B



## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: 3C

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: 01 tubo interpolador de 5 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 12124

Ensaio Nº	DPplaca ± Inc. (Pa)		DPmult ± Inc. (Pa)		P1(abs) ± Inc. (kPa)		T4 ± Inc. (°C)		Pb ± Inc. (kPa)		M.Esp ± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )		Qplaca ± Inc. (m <sup>3</sup> /s)		Vvub ± Inc. (m/s)		Rey ± Inc.		K ± Inc.	
	74	1	24.1	0.2	93.9	1.3	27.0	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.0628	0.0011	3.31	0.06	2.99E+04	9E+02	0.495	0.011
2	157	2	45.3	0.3	93.8	1.0	26.9	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.0910	0.0013	4.80	0.08	4.34E+04	1.3E+03	0.524	0.011
3	246	2	66.8	0.5	93.8	0.9	26.9	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1138	0.0017	6.00	0.10	5.42E+04	1.6E+03	0.539	0.011
4	323	3	85.7	0.7	93.8	0.9	26.9	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1301	0.0019	6.87	0.11	6.20E+04	1.8E+03	0.544	0.011
5	594	4	154.9	1.2	93.7	0.8	26.9	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.1758	0.0025	9.28	0.15	8.37E+04	2.5E+03	0.547	0.011
6	951	5	238.7	1.8	93.6	0.8	27.0	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.222	0.003	11.70	0.19	1.06E+05	3E+03	0.556	0.011
7	2136	11	517	4	93.3	0.8	26.9	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.330	0.005	17.43	0.28	1.57E+05	5E+03	0.562	0.011
8	3809	19	888	7	92.8	0.8	27.0	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.438	0.006	23.1	0.4	2.08E+05	6E+03	0.568	0.012
9	5892	30	1355	10	92.2	0.8	27.0	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.540	0.008	28.5	0.5	2.57E+05	8E+03	0.568	0.012
10	7538	38	1697	9	91.8	0.8	26.9	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.607	0.009	32.0	0.5	2.89E+05	9E+03	0.570	0.012
11	8115	41	1968	10	91.8	0.8	29.5	0.2	93.8	0.7	1.06	0.03	0.631	0.009	33.3	0.6	2.96E+05	9E+03	0.548	0.011

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifuross)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício

Vvub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em funcao do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuross

inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 16 - Resultados dos ensaios - protótipo 3C

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTÓTIPO MODELO: 4A**

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 06124

Ensaio N°	DPplaca± Inc. (Pa)		DPmult± Inc. (Pa)		P1(abs)± Inc. (kPa)		T4± Inc. (°C)		Pb± Inc. (kPa)		M.Esp± Inc. (kg/m³)		Qplaca± Inc. (m³/s)		Vtub± Inc. (m/s)		Rey± Inc.		K ± Inc.	
1	80	2	27.2	0.2	93.5	1.2	26.1	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.0654	0.0013	3.45	0.07	3.13E+04	1E+03	0.486	0.012
2	147	2	43.8	0.3	93.4	1.0	26.3	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.0881	0.0013	4.65	0.08	4.20E+04	1.2E+03	0.515	0.011
3	248	2	71.4	0.5	93.4	0.9	26.4	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.1143	0.0016	6.03	0.10	5.45E+04	1.6E+03	0.523	0.011
4	343	2	97.3	0.7	93.4	0.8	26.4	0.2	93.5	0.7	1.07	0.03	0.1341	0.0019	7.08	0.11	6.38E+04	1.9E+03	0.526	0.011
5	600	4	162.2	1.2	93.3	0.8	26.4	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.1767	0.0025	9.32	0.15	8.42E+04	2.5E+03	0.537	0.011
6	941	5	248.6	1.9	93.2	0.8	26.5	0.2	93.5	0.7	1.07	0.03	0.221	0.003	11.65	0.19	1.05E+05	3E+03	0.541	0.011
7	2087	11	525	4	92.9	0.8	26.6	0.2	93.5	0.7	1.07	0.03	0.327	0.005	17.24	0.28	1.56E+05	5E+03	0.552	0.011
8	3662	18	912	7	92.4	0.8	26.5	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.430	0.006	22.7	0.4	2.05E+05	6E+03	0.550	0.011
9	5817	29	1402	11	91.8	0.8	26.4	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.537	0.008	28.3	0.5	2.56E+05	8E+03	0.555	0.011
10	7596	38	1797	9	91.4	0.8	26.4	0.2	93.5	0.7	1.08	0.03	0.609	0.009	32.1	0.5	2.90E+05	9E+03	0.556	0.011
11	8148	41	1924	10	91.8	0.8	29.3	0.2	93.8	0.7	1.07	0.03	0.632	0.009	33.4	0.6	2.96E+05	9E+03	0.555	0.011

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 17 - Resultados dos ensaios - protótipo 4A

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTÓTIPO MODELO:** 4B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora + 1 tubo interpolador de 5 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05124

Ensaio Nº	DP <sub>placa</sub> ± Inc. (Pa)		DP <sub>mult</sub> ± Inc. (Pa)		P1(abs) ± Inc. (kPa)		T4 ± Inc. (°C)		Pb ± Inc. (kPa)		M.Esp ± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )		Q <sub>placa</sub> ± Inc. (m <sup>3</sup> /s)		V <sub>tub</sub> ± Inc. (m/s)		Rey ± Inc.		K ± Inc.	
1	82	2	26.5	0.2	93.6	1.2	26.9	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.0561	0.0013	3.49	0.07	3.14E+04	1E+03	0.497	0.012
2	157	2	47.9	0.4	93.6	1.0	26.8	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.0911	0.0013	4.81	0.08	4.34E+04	1.3E+03	0.509	0.011
3	230	2	67.1	0.5	93.6	0.9	26.9	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.1102	0.0016	5.81	0.10	5.24E+04	1.6E+03	0.520	0.011
4	347	3	97.7	0.7	93.5	0.9	26.9	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.1350	0.0019	7.12	0.12	6.41E+04	1.9E+03	0.528	0.011
5	580	3	159.7	1.2	93.5	0.8	27.0	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.1740	0.0024	9.18	0.15	8.27E+04	2.4E+03	0.532	0.011
6	922	5	249.3	1.9	93.4	0.8	27.1	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.219	0.003	11.54	0.19	1.04E+05	3E+03	0.535	0.011
7	2090	11	540	4	93.0	0.8	27.0	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.327	0.005	17.25	0.28	1.55E+05	5E+03	0.544	0.011
8	3725	19	940	7	92.6	0.8	27.1	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.434	0.006	22.9	0.4	2.06E+05	6E+03	0.547	0.011
9	5847	29	1436	11	92.0	0.8	26.9	0.2	93.6	0.7	1.07	0.03	0.538	0.008	28.4	0.5	2.56E+05	8E+03	0.549	0.011
10	7576	38	1816	9	91.8	0.8	26.7	0.2	93.9	0.7	1.08	0.03	0.608	0.009	32.1	0.5	2.90E+05	9E+03	0.552	0.011

### LEGENDA:

DP<sub>placa</sub>, mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Q<sub>placa</sub> = Vazão em volume medida através da placa de orifício

V<sub>tub</sub> = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 18 - Resultados dos ensaios - protótipo 4B (med. 06124)

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTÓTIPO MODELO: 4B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora + 1 tubo interpolador de 5mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 13124

Ensaio N°	DPplaca ± Inc. (Pa)	DPmult ± Inc. (Pa)	P1(abs) ± Inc. (kPa)	T4 ± Inc. (°C)	Pb ± Inc. (kPa)	M.Esp ± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca ± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub ± Inc. (m/s)	Rey ± Inc.	K ± Inc.				
1	87	2	30.6	0.2	93.8	1.2	0.0680	0.0011	3.59	0.06	3.25E+04	1E+03	0.476	0.010
2	159	2	48.4	0.4	93.7	1.0	0.0916	0.0014	4.83	0.08	4.37E+04	1.3E+03	0.510	0.011
3	244	2	71.5	0.5	93.7	0.9	0.1132	0.0016	5.97	0.10	5.40E+04	1.6E+03	0.519	0.011
4	355	3	100.4	0.8	93.7	0.9	0.1363	0.0019	7.19	0.12	6.50E+04	1.9E+03	0.527	0.011
5	594	4	164.4	1.2	93.6	0.8	0.1758	0.0025	9.27	0.15	8.38E+04	2.5E+03	0.531	0.011
6	939	5	255.7	1.9	93.5	0.8	0.221	0.003	11.63	0.19	1.05E+05	3E+03	0.533	0.011
7	2090	11	539	4	93.2	0.8	0.327	0.005	17.24	0.28	1.56E+05	5E+03	0.544	0.011
8	3776	19	948	7	92.7	0.8	0.436	0.006	23.0	0.4	2.07E+05	6E+03	0.548	0.011
9	5857	29	1439	11	92.1	0.8	0.539	0.008	28.4	0.5	2.56E+05	8E+03	0.549	0.011
10	7459	37	1780	9	91.7	0.8	0.604	0.009	31.9	0.5	2.87E+05	9E+03	0.554	0.011
11	8133	41	1947	10	91.8	0.8	0.632	0.009	33.3	0.6	2.96E+05	9E+03	0.551	0.011

### LEGENDA:

DPplaca, mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazão em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 19 - Resultados dos ensaios - protótipo 4B (med. 13124)

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTÓTIPO MODELO: 4B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora + 1 tubo interpolador de 5 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.	K ± Inc.
1	82	2	28.6 0.2	26.3 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.0563	3.50	3.17E+04	0.480 0.011
2	150	2	47.3 0.4	26.3 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.0889	4.69	4.24E+04	0.501 0.010
3	243	2	73.4 0.6	26.3 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.1131	5.97	5.40E+04	0.511 0.010
4	330	2	93.6 0.7	26.3 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.1314	6.93	6.27E+04	0.526 0.011
5	577	3	159.1 1.2	26.5 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.1732	9.14	8.26E+04	0.532 0.011
6	927	5	250.0 1.9	26.4 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.219	11.55	1.04E+05	0.536 0.011
7	2136	11	553 4	26.4 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.330	17.42	1.58E+05	0.543 0.011
8	3797	19	955 7	26.4 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.437	23.1	2.09E+05	0.547 0.011
9	5838	29	1436 11	26.3 0.2	93.6 0.7	1.08 0.03	0.538	28.4	2.56E+05	0.549 0.011
10	7556	38	1803 9	26.6 0.2	93.6 0.7	1.07 0.03	0.608	32.1	2.89E+05	0.553 0.011

### LEGENDA:

DPplaca, mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazão em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazão para o medidor multifuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela 20 - Resultados dos ensaios - protótipo 4B (med. 05015)

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

### MEDIDOR ANNUBAR – DIETERICH

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: 01 tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 08124

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)		DPmult± Inc. (Pa)		P1(abs)± Inc. (kPa)		T4± Inc. (°C)		Pb± Inc. (kPa)		M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )		Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)		Vtub± Inc. (m/s)		Rey± Inc.		K ± Inc.	
1	82	2	24.8	0.2	93.9	1.2	24.9	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.0659	0.0013	3.48	0.07	3.19E+04	1E+03	0.515	0.012
2	159	2	41.3	0.3	93.8	1.0	24.9	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.0911	0.0013	4.81	0.08	4.41E+04	1.3E+03	0.552	0.011
3	228	2	55.8	0.4	93.8	1.0	24.8	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.1090	0.0016	5.75	0.10	5.28E+04	1.6E+03	0.567	0.012
4	347	3	82.0	0.6	93.8	0.9	24.9	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.1340	0.0019	7.07	0.12	6.48E+04	1.9E+03	0.576	0.012
5	615	4	138.3	1.0	93.7	0.8	25.0	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.1779	0.0025	9.39	0.15	8.60E+04	2.5E+03	0.588	0.012
6	966	5	212.1	1.6	93.6	0.8	25.1	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.222	0.003	11.73	0.19	1.08E+05	3E+03	0.594	0.012
7	2079	11	441	3	93.3	0.8	25.2	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.324	0.005	17.11	0.27	1.57E+05	5E+03	0.601	0.012
8	3733	19	766	6	92.8	0.8	25.2	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.431	0.006	22.8	0.4	2.08E+05	6E+03	0.606	0.012
9	5847	29	1187	9	92.3	0.8	25.3	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.535	0.008	28.2	0.5	2.59E+05	8E+03	0.604	0.012
10	7671	38	1494	8	91.8	0.8	25.2	0.2	93.9	0.7	1.09	0.03	0.609	0.009	32.1	0.5	2.94E+05	9E+03	0.612	0.012
11	8184	41	1582	8	91.8	0.8	29.4	0.2	93.8	0.7	1.07	0.03	0.633	0.009	33.4	0.6	2.97E+05	9E+03	0.613	0.013

#### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orificio, multifuross)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orificio

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orificio

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuross

Inc. = Incerteza global associada 'a cada grandeza

Tabela 21 - Resultados dos ensaios - medidor ANR 75

As equações do ajuste  $K \times R$ , obtidas para cada protótipo estão na tabela 22 ( $30.000 < R < 300.000$ ), e na tabela 23 ( $100.000 < R < 300.000$ ).

Os gráficos apresentam os pontos experimentais, a representação da curva obtida no ajuste e a respectiva faixa que estabelece o intervalo com 95% de confiança.

Nas figuras nº 44 a nº 58 estão traçados os gráficos para todo o intervalo de ensaios, e nas figuras de nº 59 a nº 73 para aqueles para  $100.000 < R < 300.000$ .

PROTÓTIPO Nº	EQUAÇÃO DE AJUSTE	INCERTEZA DO AJUSTE	COEFICIENTE CORRELAÇÃO
1A	$K = e^{(-1,38849 + 0,0748745 \ln R)}$	$\pm 0,007$	0,992
1B	$K = e^{(-1,3024 + 0,067959 \ln R)}$	$\pm 0,007$	0,993
2A	$K = e^{(-1,36984 + 0,0716126 \ln R)}$	$\pm 0,01$	0,987
2B	$K = e^{(-1,22675 + 0,0593705 \ln R)}$	$\pm 0,007$	0,991
2C	$K = e^{(-1,34037 + 0,0682275 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,946
2D	$K = e^{(-1,26195 + 0,0610014 \ln R)}$	$\pm 0,008$	0,986
2E	$K = e^{(-1,31925 + 0,0656157 \ln R)}$	$\pm 0,01$	0,957
3A	$K = e^{(-1,20251 + 0,0503024 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,934
3B	$K = e^{(-1,12915 + 0,0442643 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,911
3C	$K = e^{(-1,20074 + 0,0518934 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,922
4A	$K = e^{(-1,18379 + 0,0481911 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,929
4B (m.06124)	$K = e^{(-1,12657 + 0,0428994 \ln R)}$	$\pm 0,01$	0,962
4B (m.13124)	$K = e^{(-1,2287 + 0,0512264 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,911
4B (m.05015)	$K = e^{(-1,27357 + 0,0550562 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,936
ANR 75	$K = e^{(-1,24156 + 0,0605002 \ln R)}$	$\pm 0,02$	0,914

Tabela 22 - Equações de ajuste para o Coeficiente de Vazão (K) em função de Reynolds (R).  
Faixa:  $3 \times 10^4 < R < 3 \times 10^5$ .

PROTÓTIPO Nº	EQUAÇÃO DE AJUSTE	INCERTEZA DO AJUSTE	COEFICIENTE CORRELAÇÃO
1A	$K = e^{(-1,30801 + 0,0683268 \ln R)}$	$\pm 0,009$	0,962
1B	$K = e^{(-1,24527 + 0,0632796 \ln R)}$	$\pm 0,007$	0,971
2A	$K = 0,558978 + 2,30978^{-7} R$	$\pm 0,003$	0,988
2B	$K = e^{(-1,39217 + 0,0727346 \ln R)}$	$\pm 0,005$	0,989
2C	$K = e^{(-1,24074 + 0,0597187 \ln R)}$	$\pm 0,004$	0,992
2D	$K = 0,554478 + 1,9143^{-7} R$	$\pm 0,001$	0,997
2E	$K = 0,558835 + 1,63519^{-7} R$	$\pm 0,001$	0,998
3A	$K = 0,538328 + 7,87938^{-8} R$	$\pm 0,004$	0,855
3B	$K = e^{(-0,881898 + 0,0239098 \ln R)}$	$\pm 0,004$	0,939
3C	$K = e^{(-0,872388 + 0,0247539 \ln R)}$	$\pm 0,002$	0,979
4A	$K = e^{(-0,877885 + 0,0231187 \ln R)}$	$\pm 0,005$	0,919
4B (m.06124)	$K = e^{(-0,954038 + 0,0286112 \ln R)}$	$\pm 0,002$	0,984
4B (m.13124)	$K = e^{(-1,00067 + 0,0324109 \ln R)}$	$\pm 0,004$	0,965
4B (m.05015)	$K = e^{(-0,956802 + 0,028855 \ln R)}$	$\pm 0,002$	0,993
ANR 75	$K = e^{(-0,83974 + 0,027539 \ln R)}$	$\pm 0,004$	0,942

Tabela 23 - Equações de ajuste para o Coeficiente de Vazão (K) em função de Reynolds (R).  
Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$ .

Observando-se os valores das grandezas medidas e calculadas, houve apenas um ponto que sugeriu problemas no seu processo de medição. Foi o ensaio número 11 do protótipo 3C. O valor do coeficiente de vazão obtido influenciou a curva de ajuste com uma tendência contrária à esperada e obtida nos outros resultados. Decidiu-se pela desconsideração deste ponto nas regressões realizados.



PROTOTIPO MULTIFUROS 1A

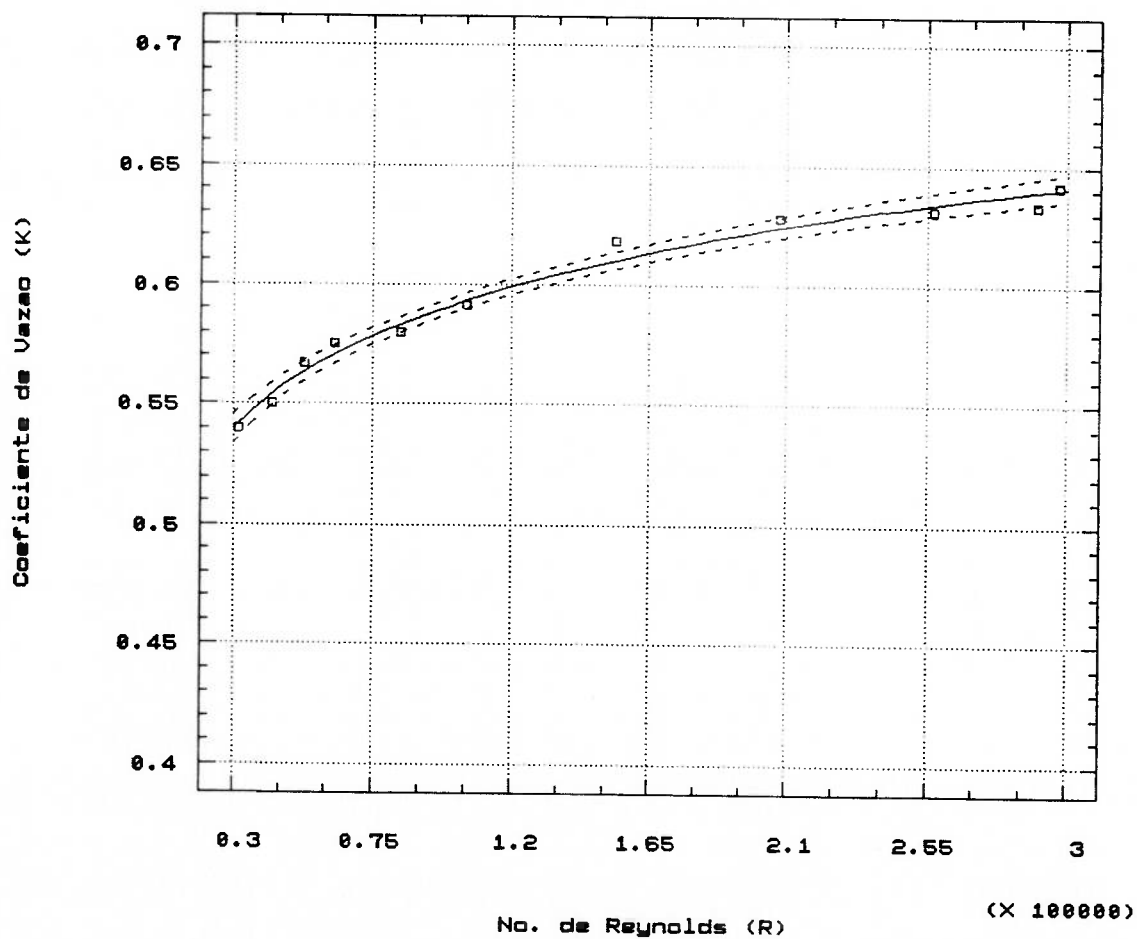
Regressao tipo:  $K = a \cdot R^b$ 

Figura 44 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 A.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 1B

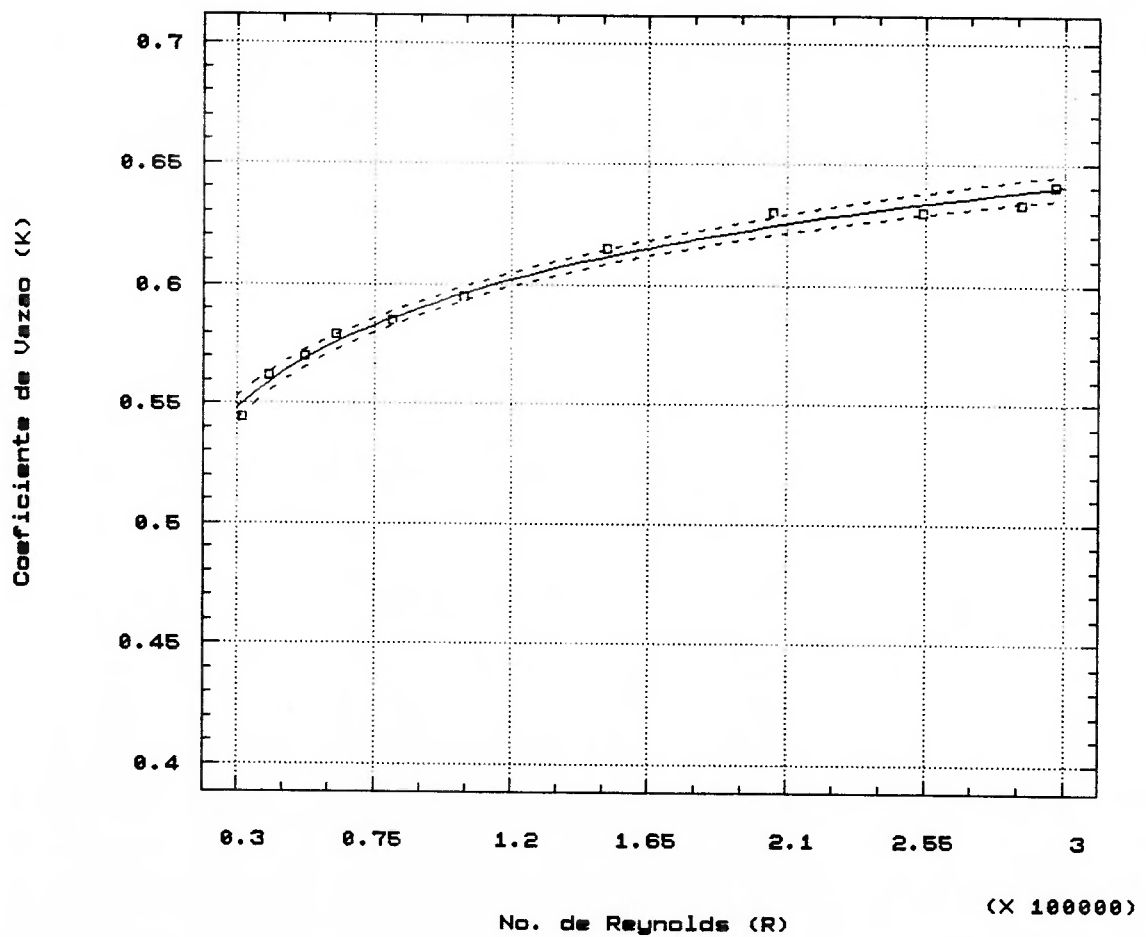
Regressao tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 45 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 B.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2A

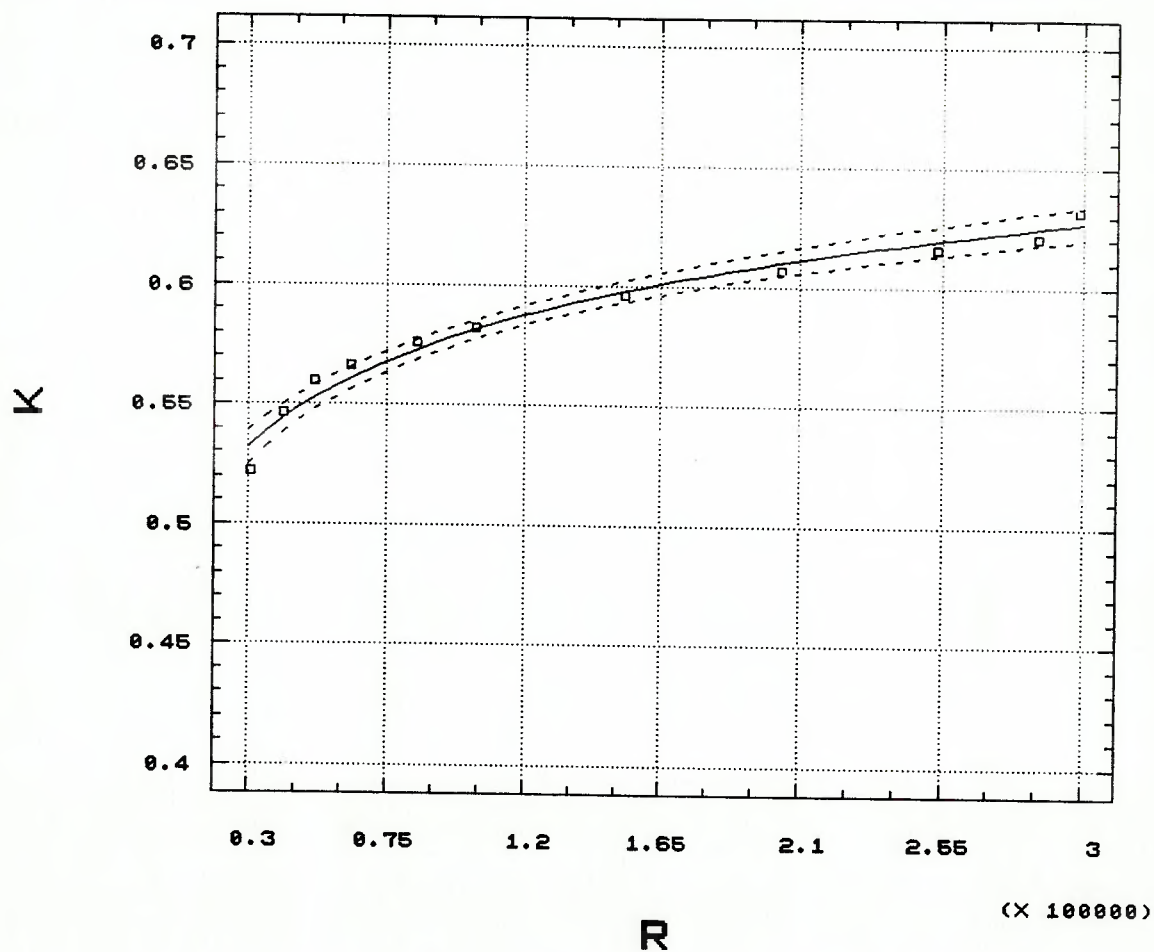
Regressão tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 46 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2A.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2B

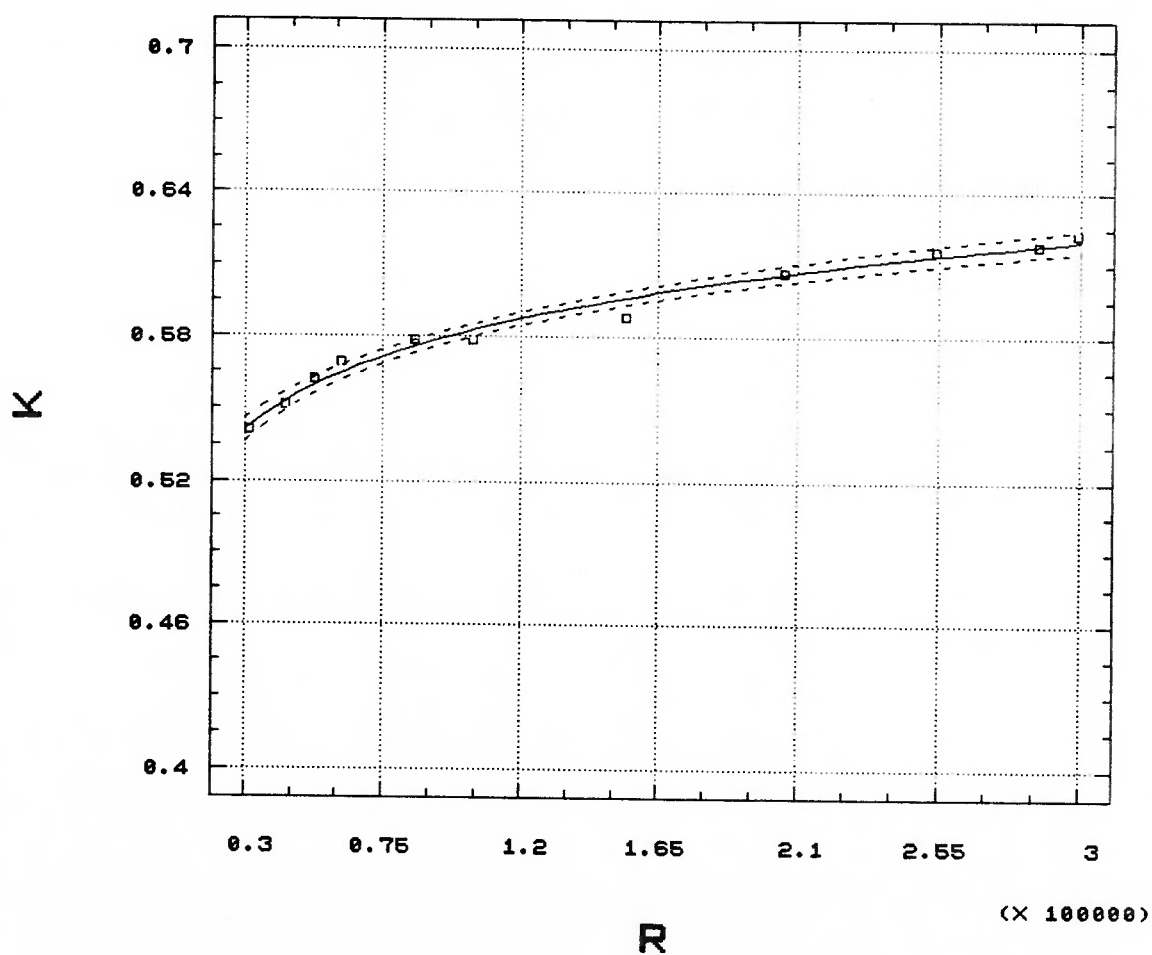
Regressao tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 47 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 B.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2C

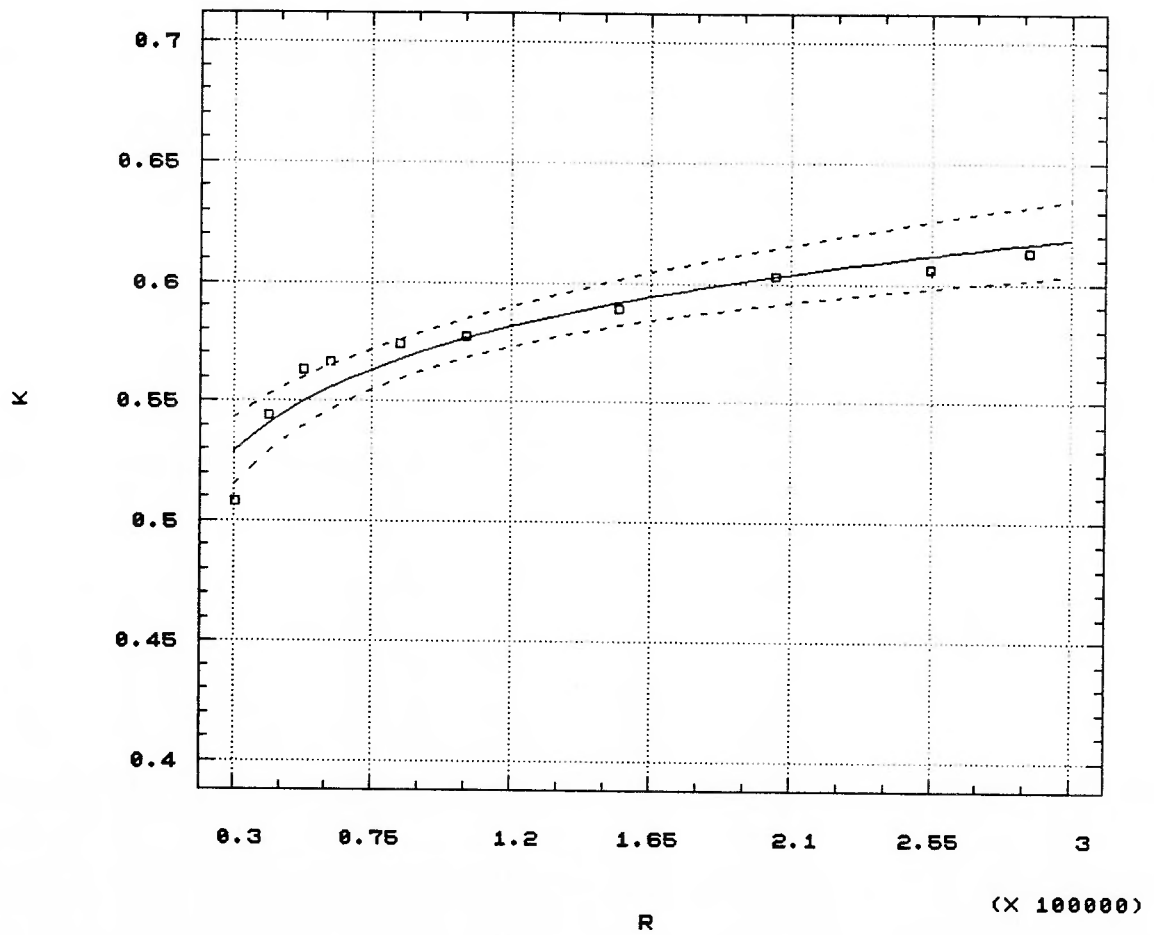
Regressao tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 48 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 C.

PROTOTIPO MULTIFUROS 2D

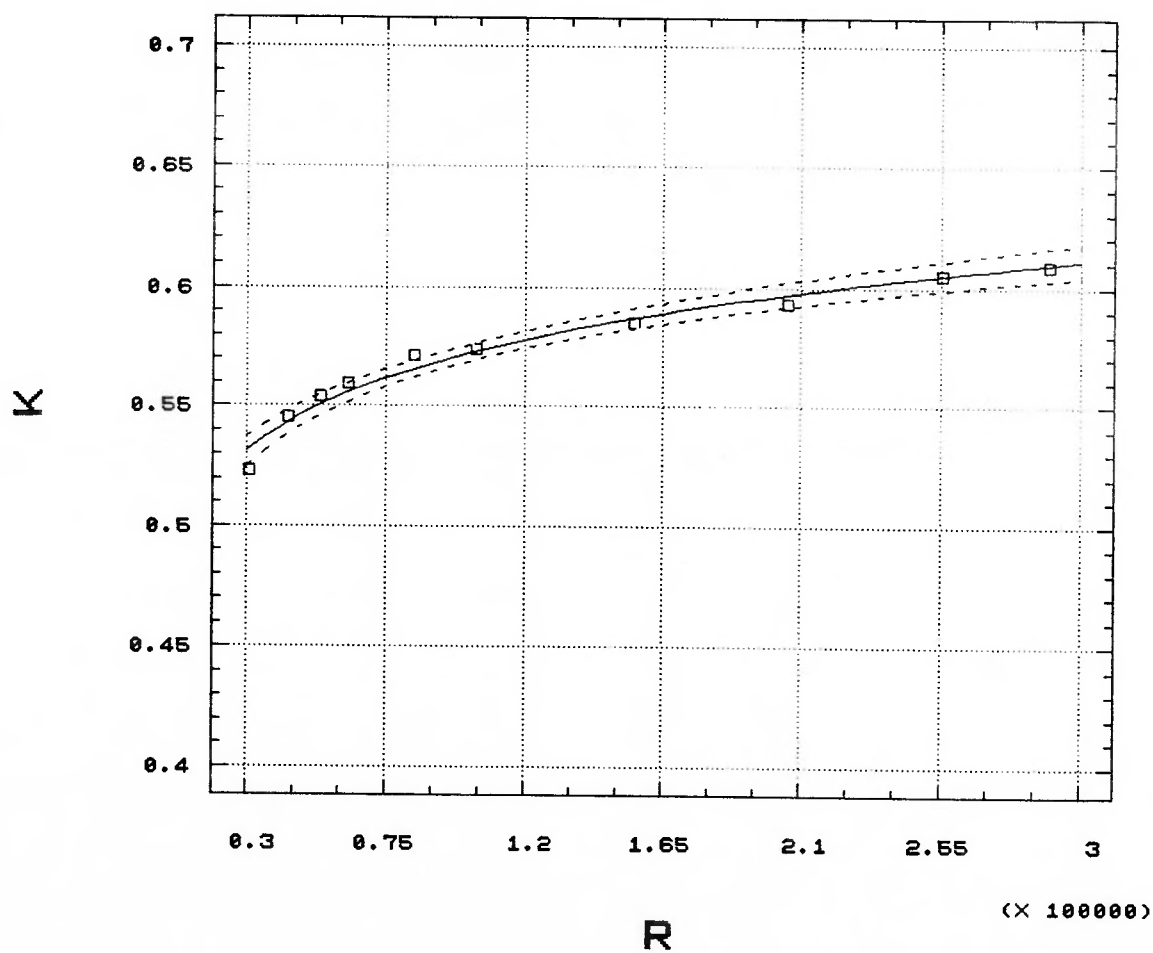
Regressao tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 49 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 D.

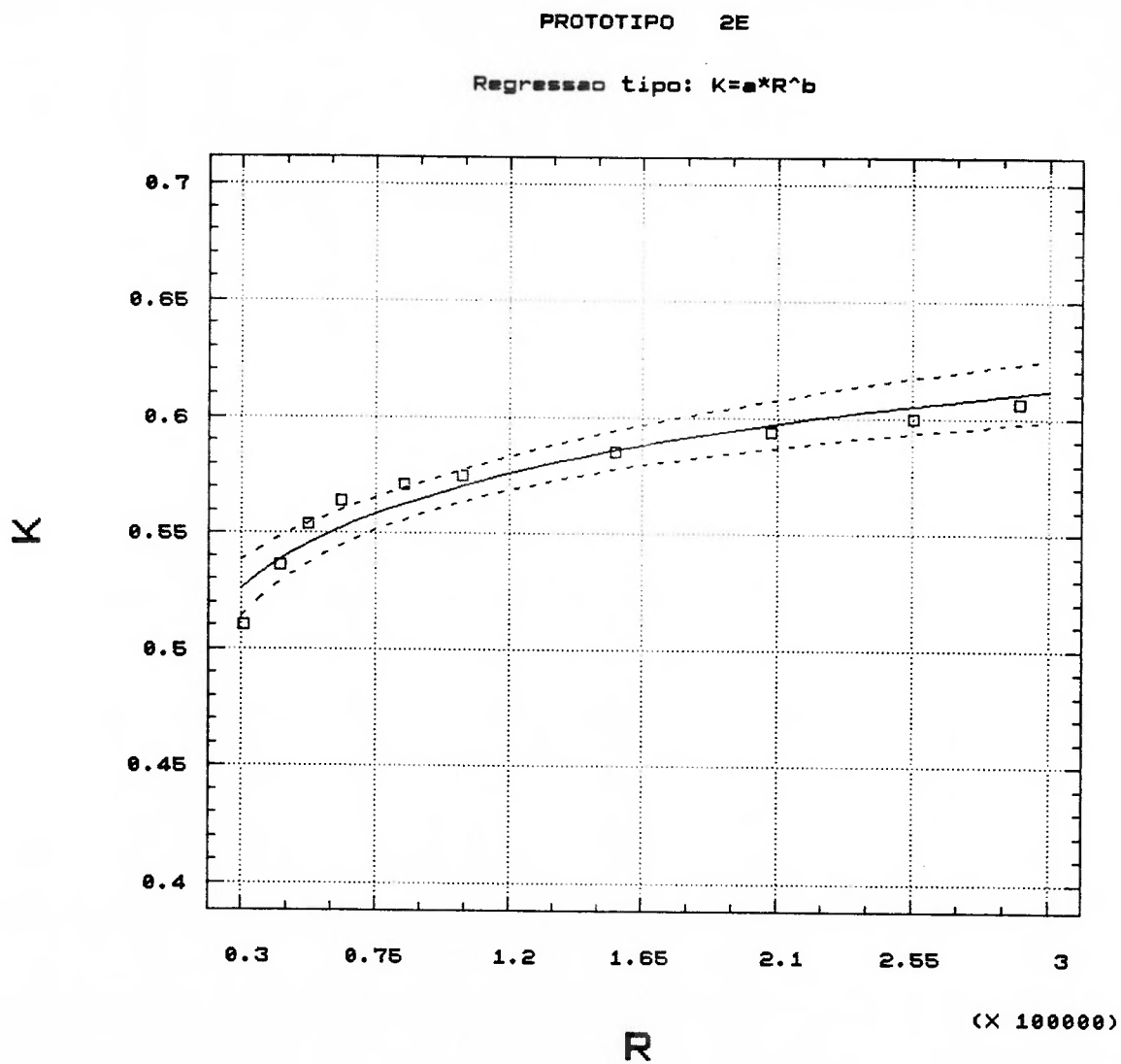


Figura 50 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 E.

PROTOTIPO MULTIFUROS 3A

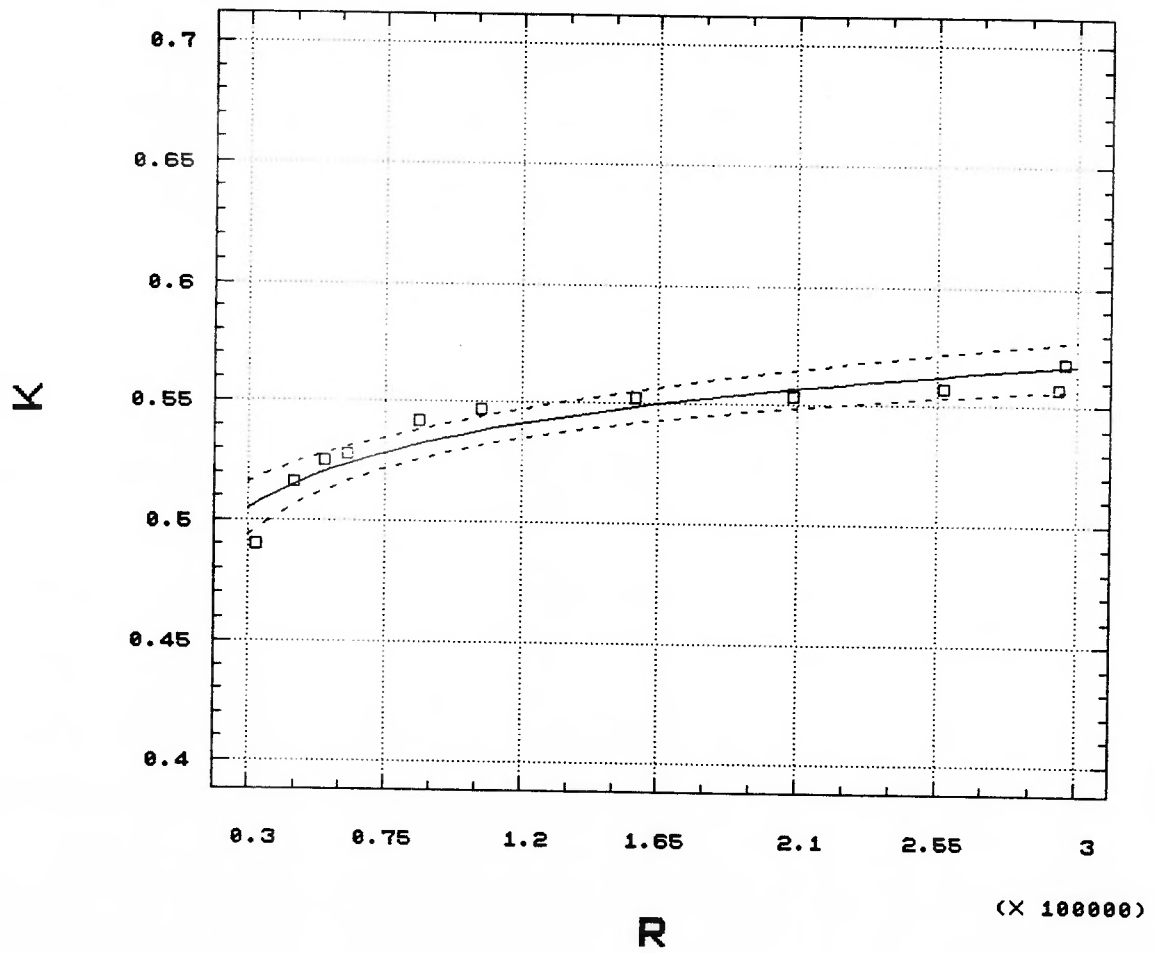
Regressao tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 51 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 A.



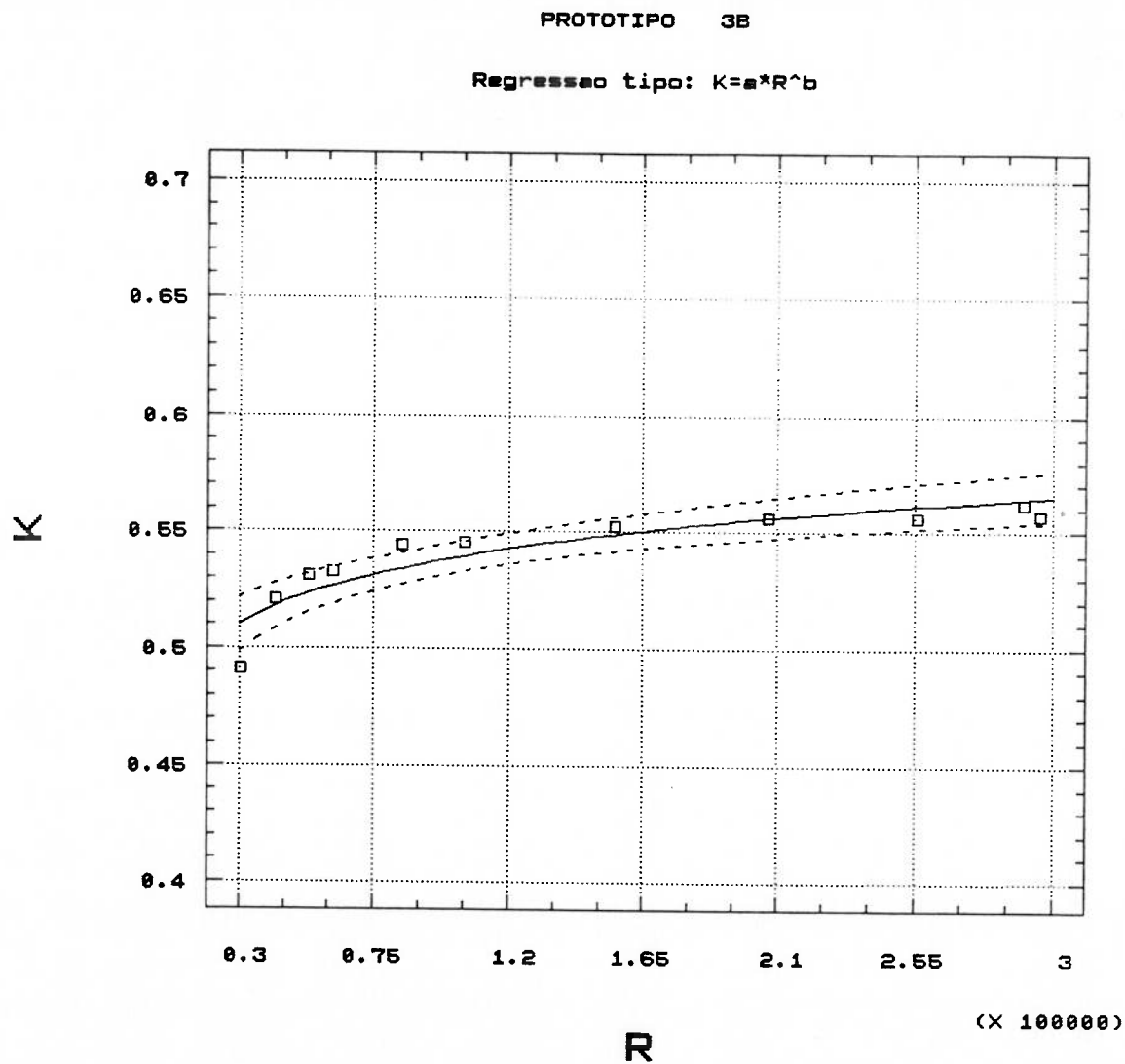


Figura 52 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 B.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 3C

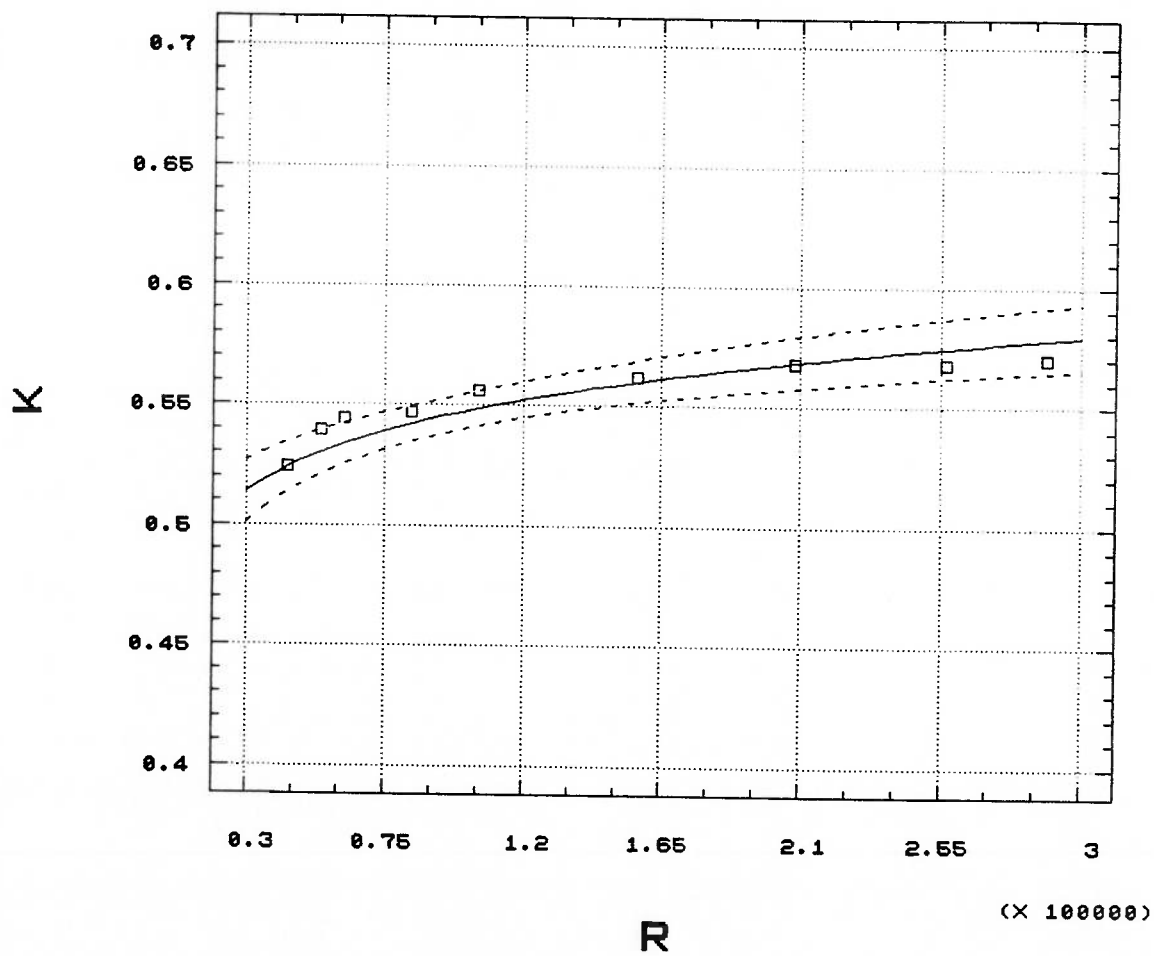
Regressão tipo:  $K=a \cdot R^b$  (Vazões 1 a 10)

Figura 53 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 C.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 4A

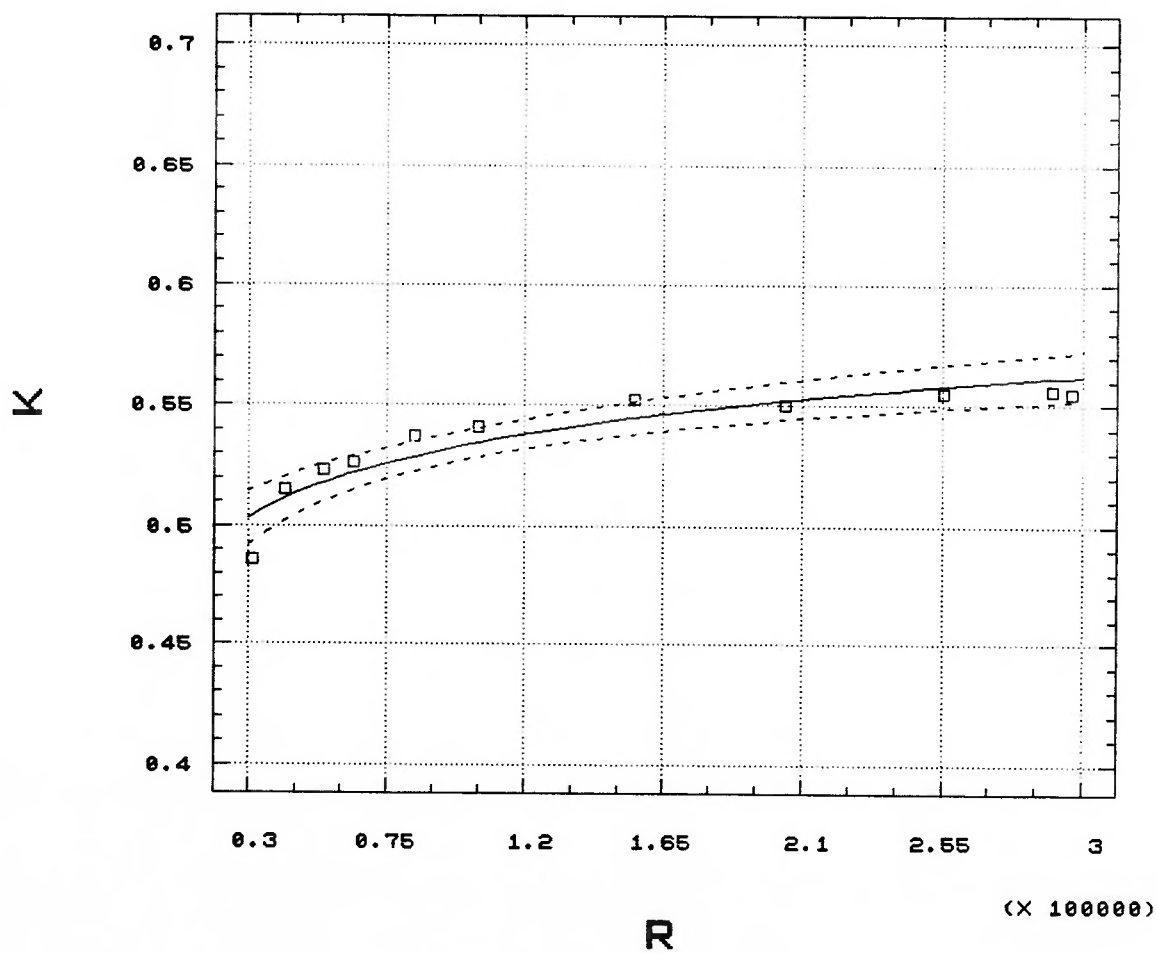
Regressao tipo:  $K=a*R^b$ 

Figura 54 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 A.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 4B

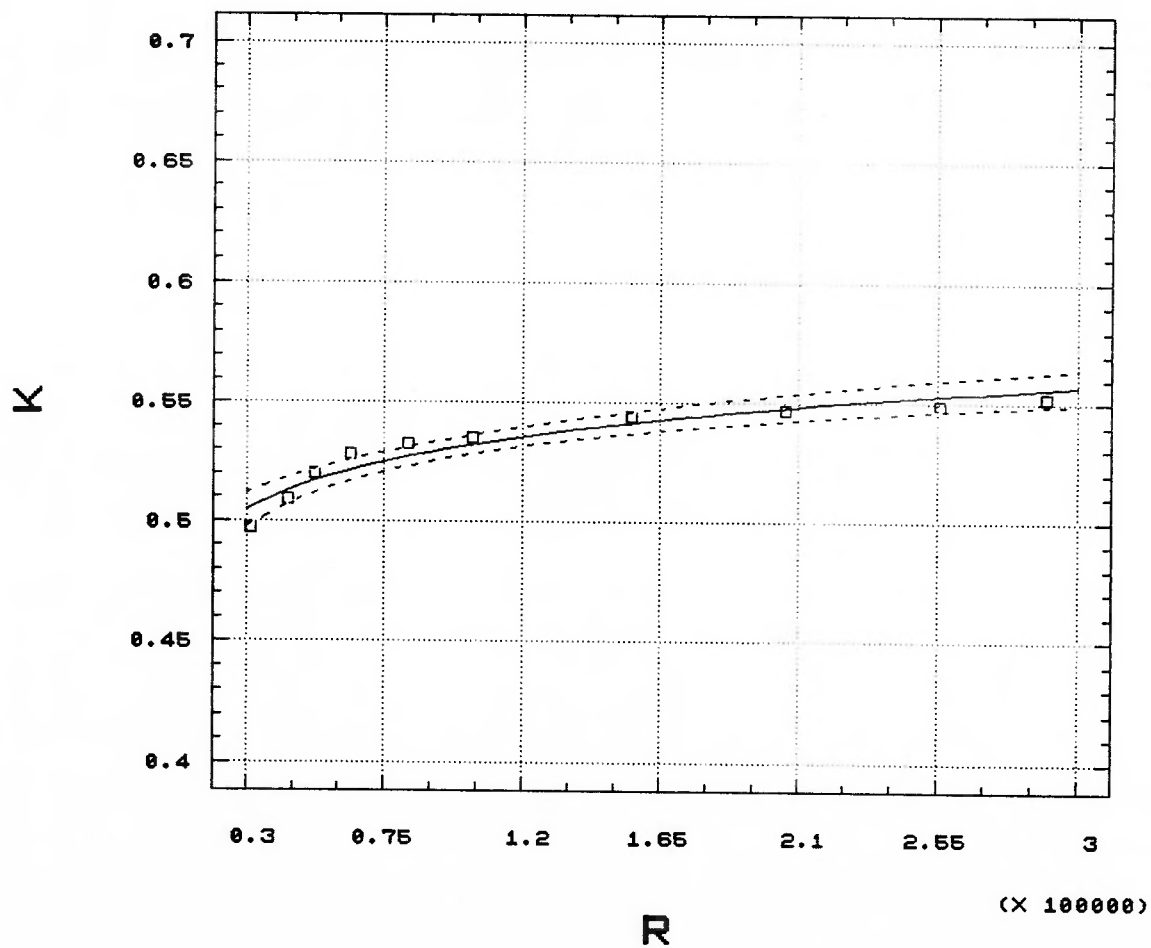
Regressão tipo:  $K=aR^b$  (med.06124)

Figura 55 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 06124.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 4B

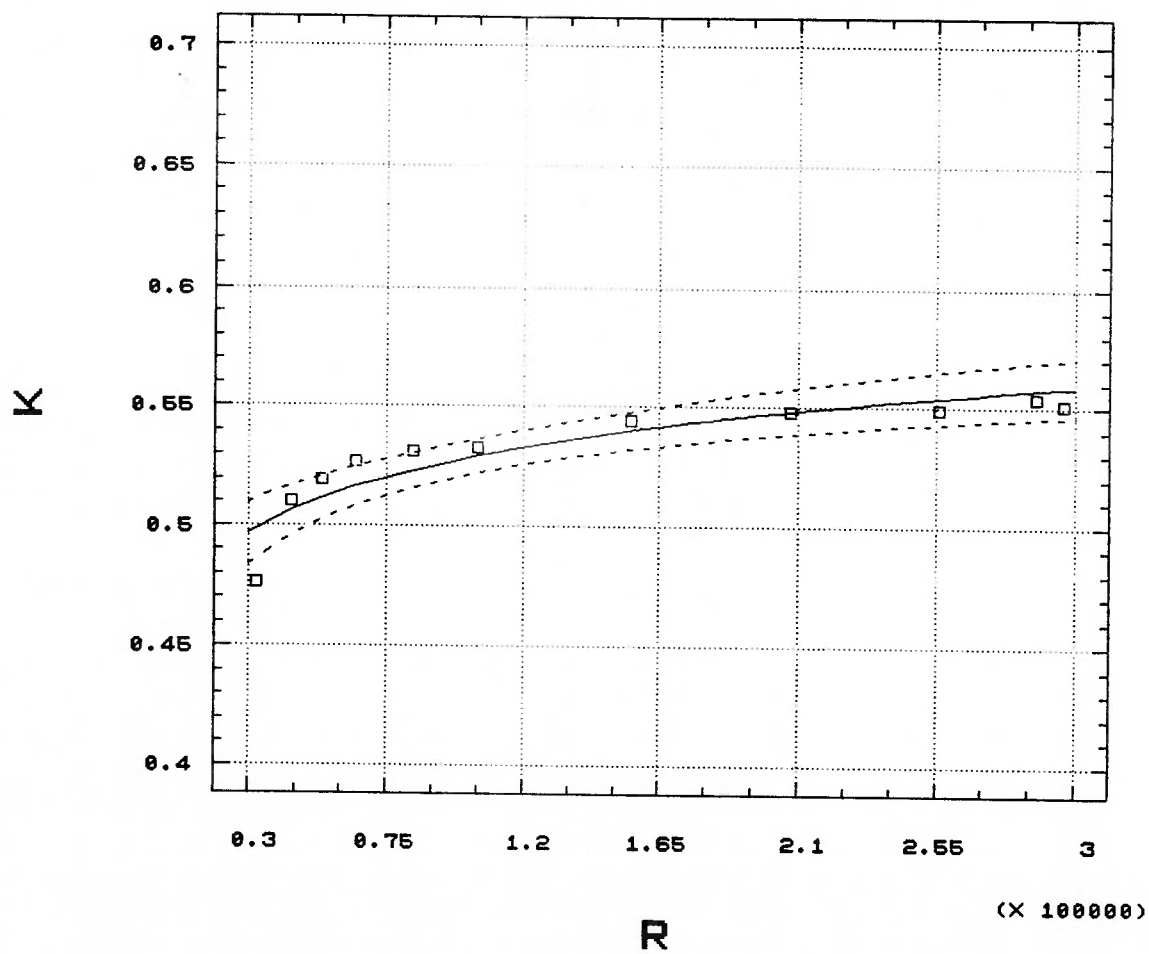
Regressão tipo:  $K=a \cdot R^b$  (med. 13124)

Figura 56 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 13124.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 4B

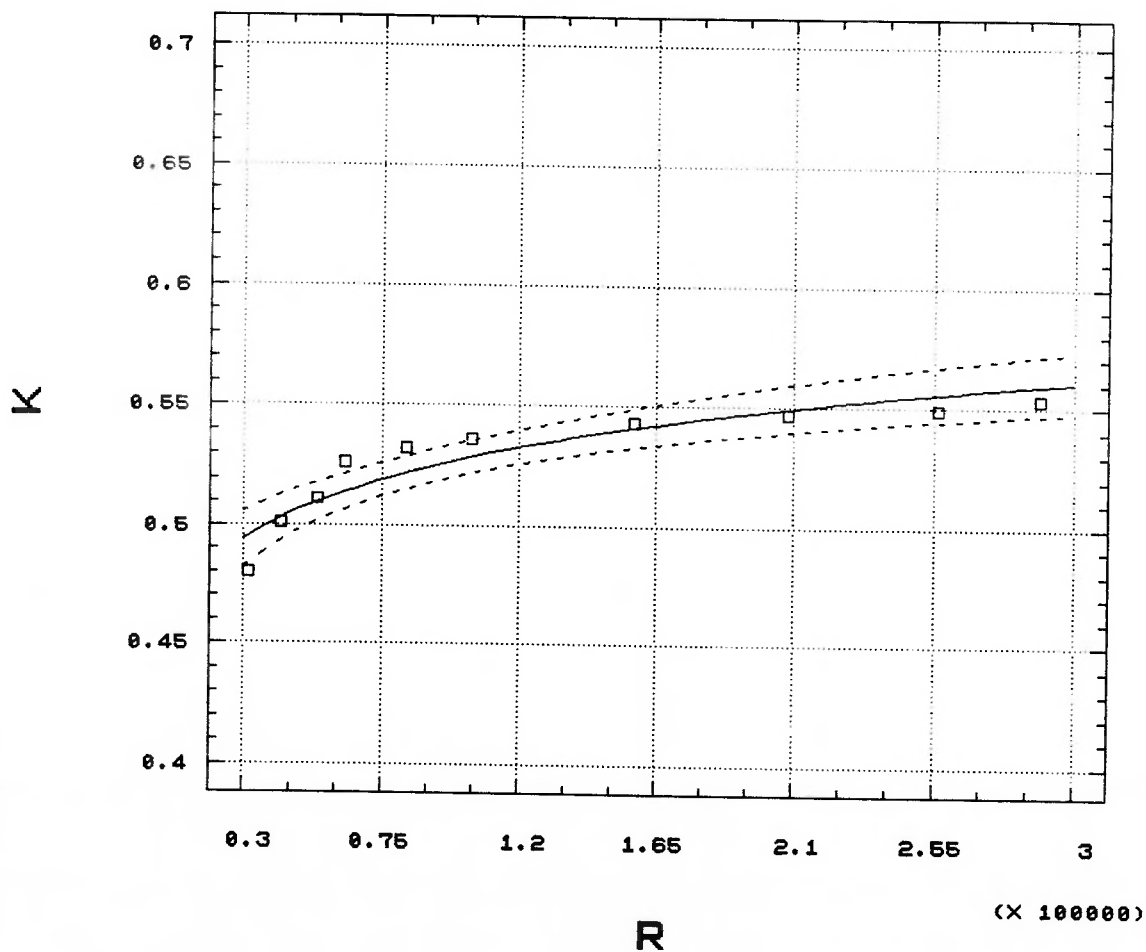
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  (med.05015)

Figura 57 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med.05015.

## MEDIDOR ANNUBAR ANR 75 - DIETERICH

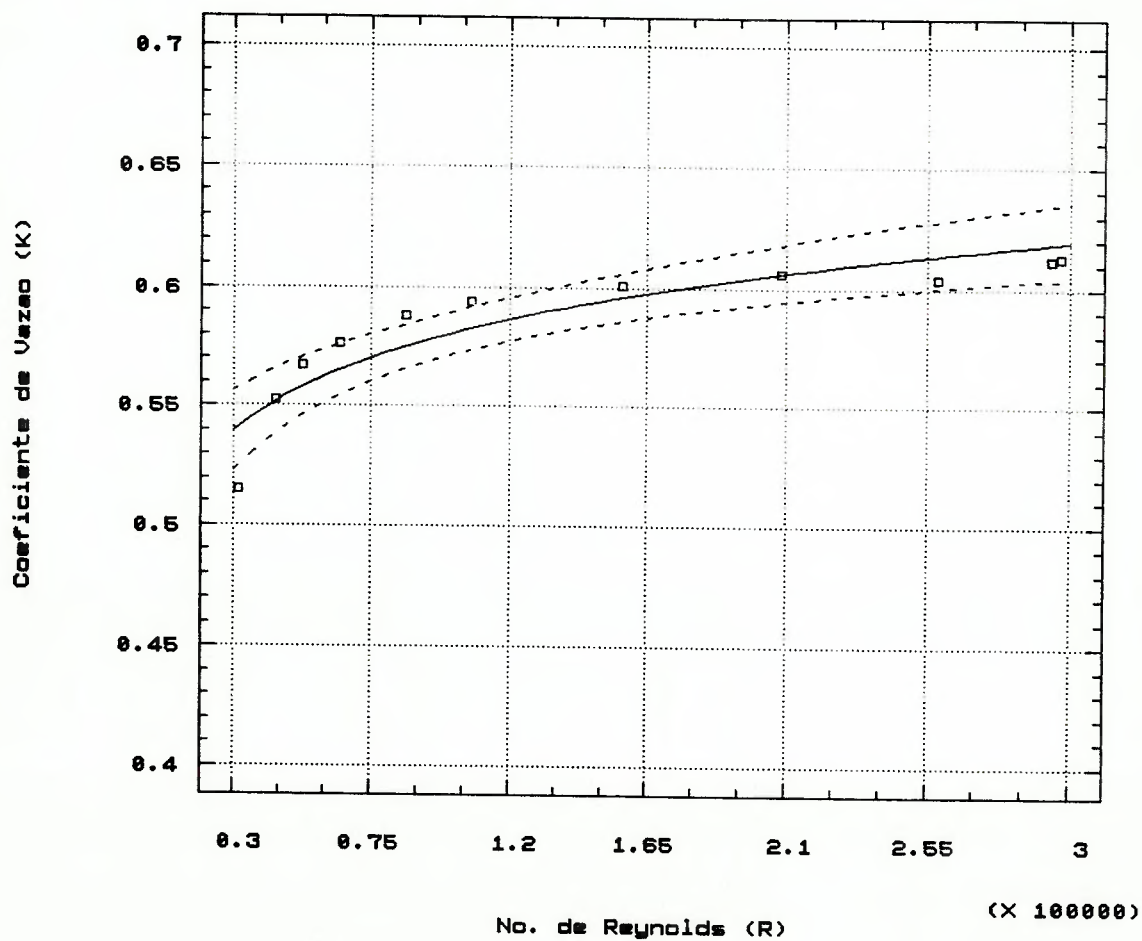
Regressão tipo:  $K = a \cdot R^b$ 

Figura 58 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - Annubar - ANR 75.

## PROTOTIPO MULTIFUROS 1A

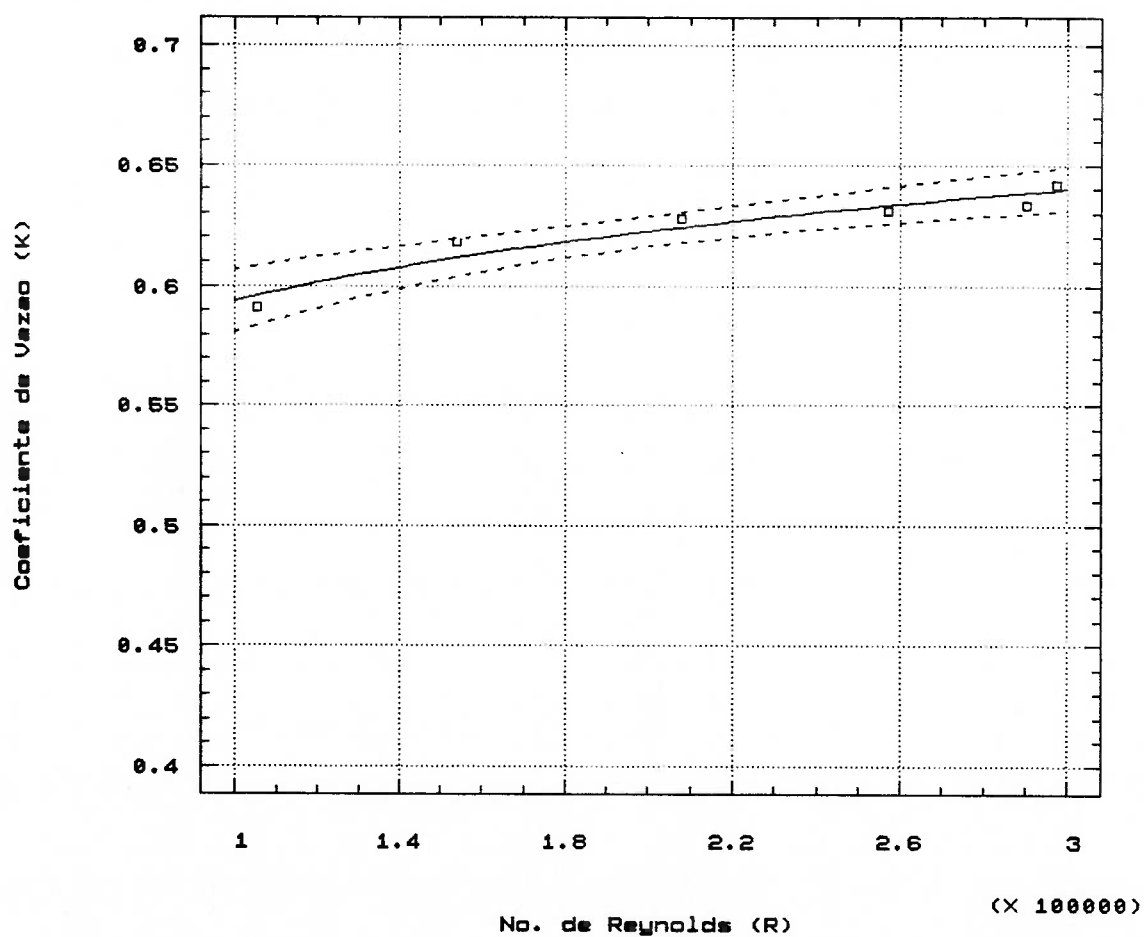
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 59 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 A.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$



## PROTOTIPO MULTIFUROS 1B

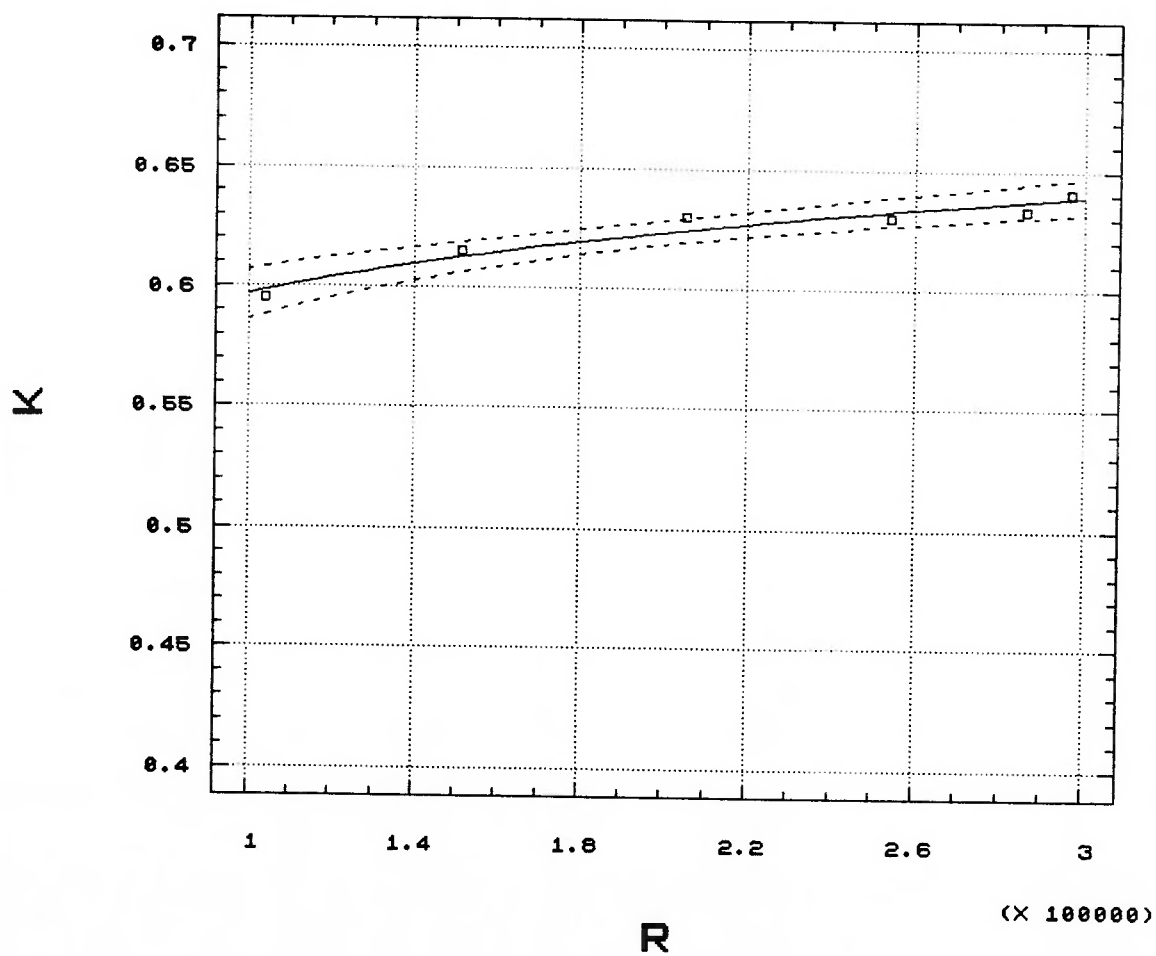
Regressão tipo:  $K=aR^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 60 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 1 B.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

PROTOTIPO MULTIFUROS 2A

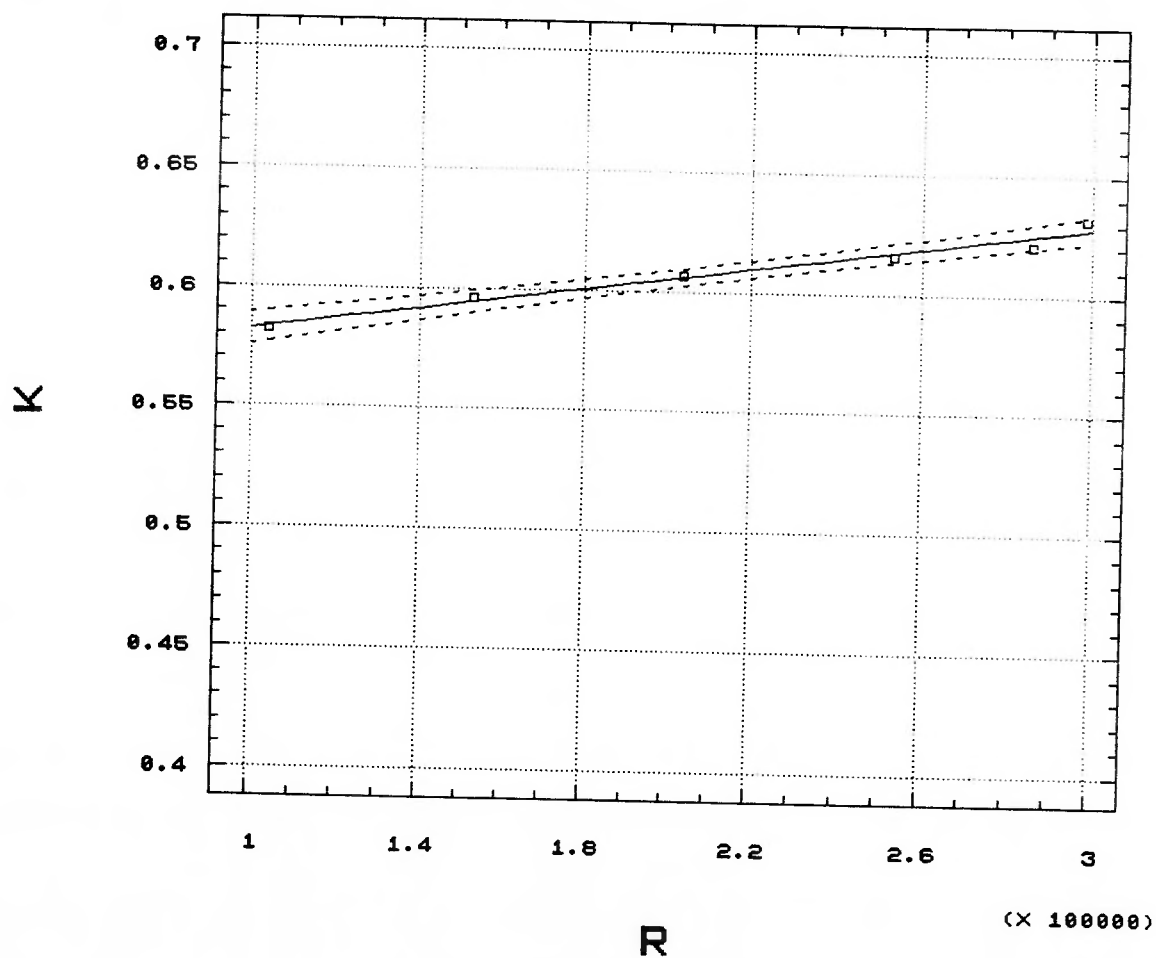
Regressão Linear ( $R > 100.000$ )

Figura 61 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2A.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2B

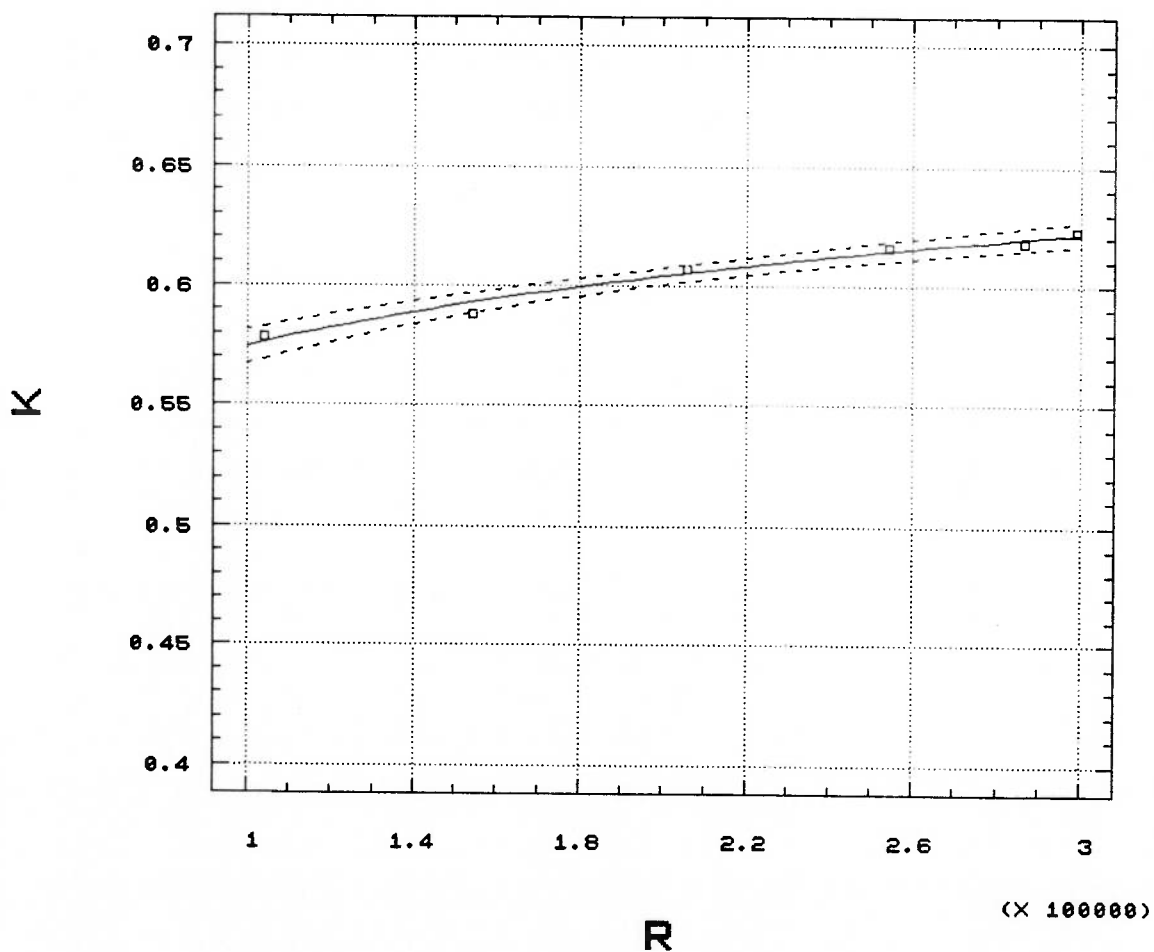
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 62 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 B.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2C

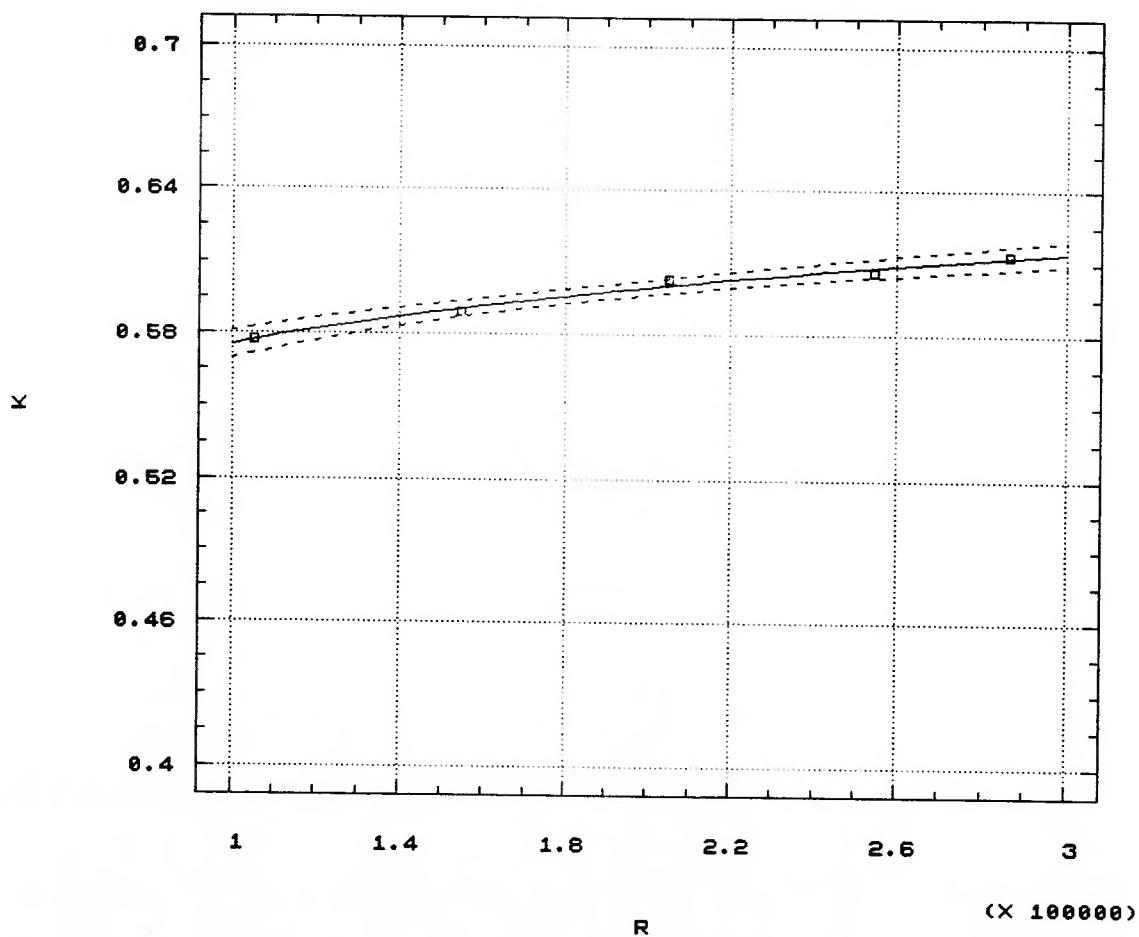
Regressão tipo:  $K=a \cdot R^b$  ( $R > 100.000$ )

Figura 63 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 C.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2D

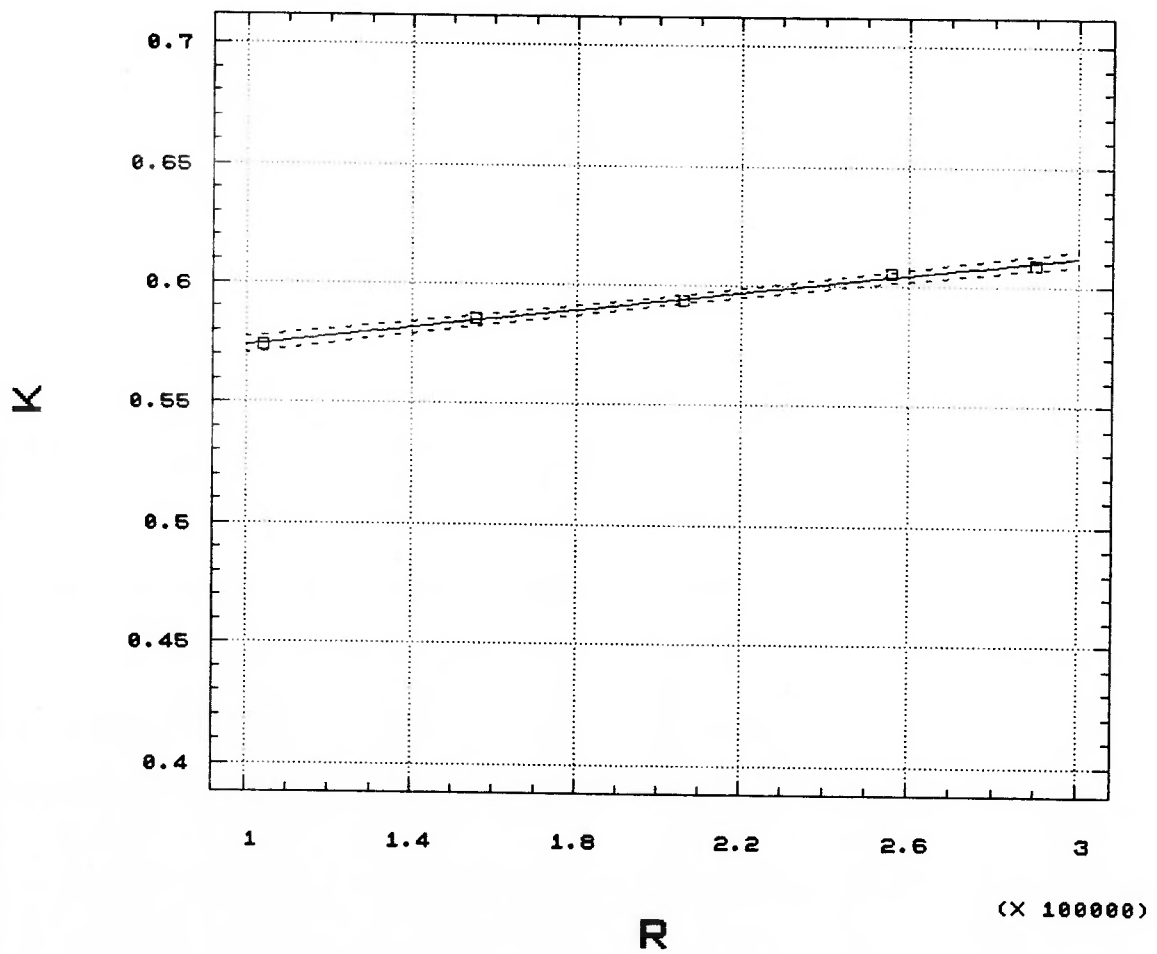
Regressão Linear ( $R > 100.000$ )

Figura 64 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 D.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 2E

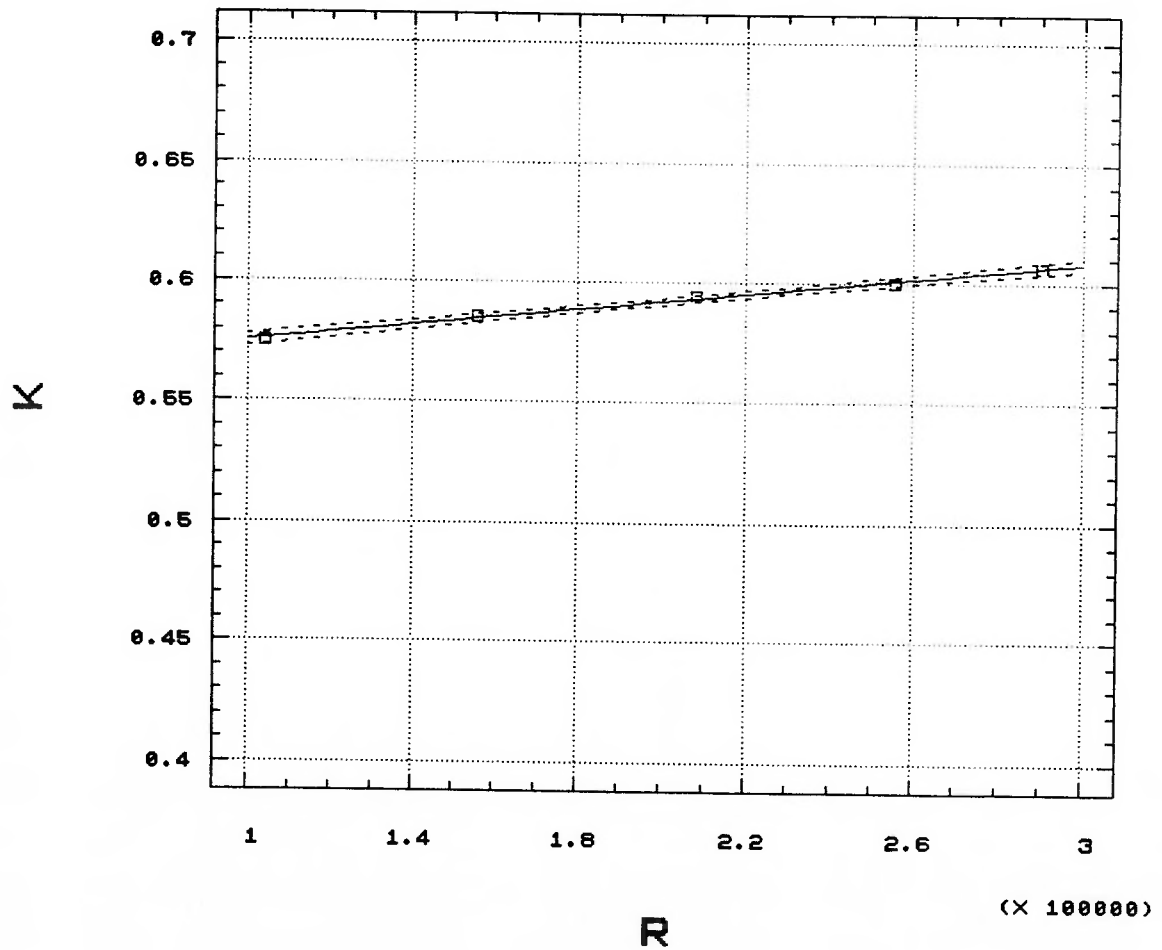
Regressão Linear ( $R > 100.000$ )

Figura 65 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 2 E.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 3A

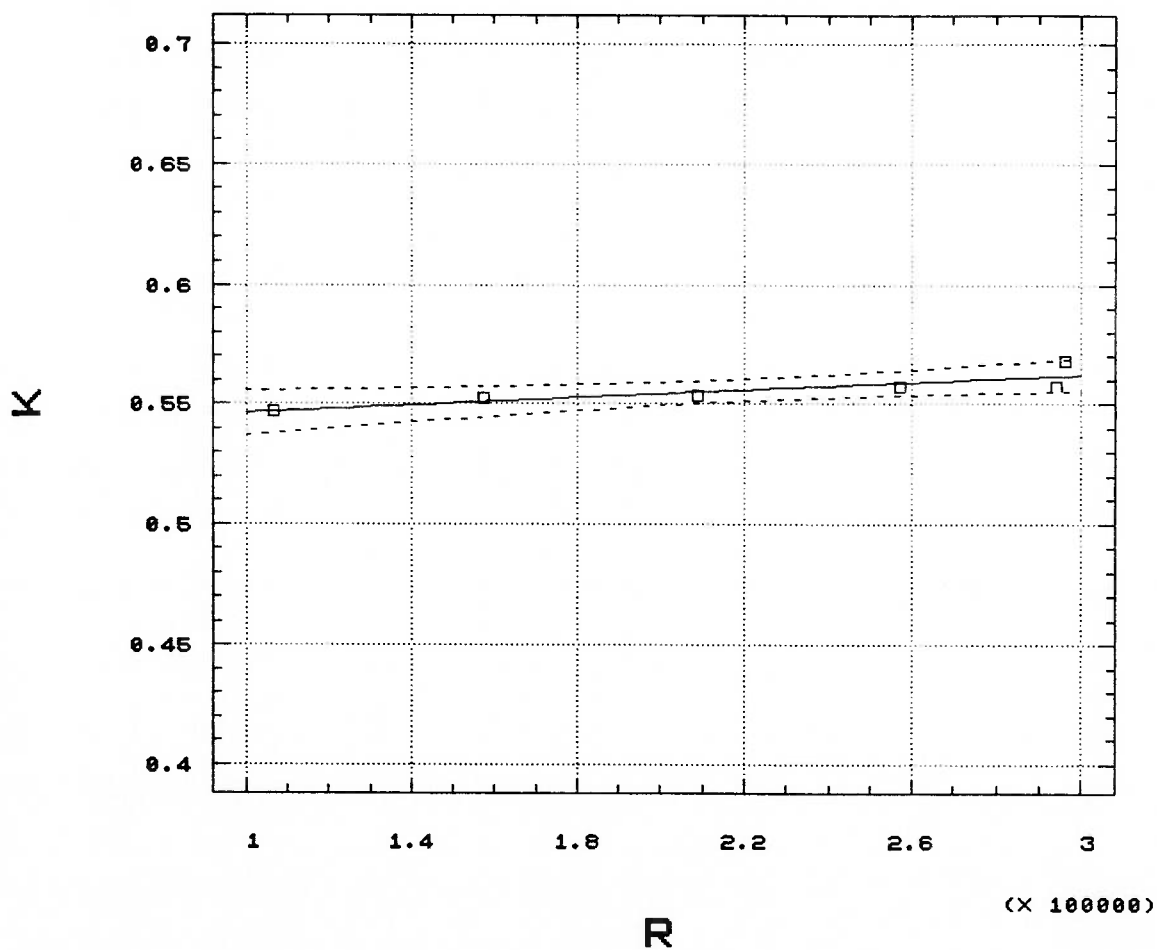
Regressão Linear ( $R > 100.000$ )

Figura 66 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 A.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 3B

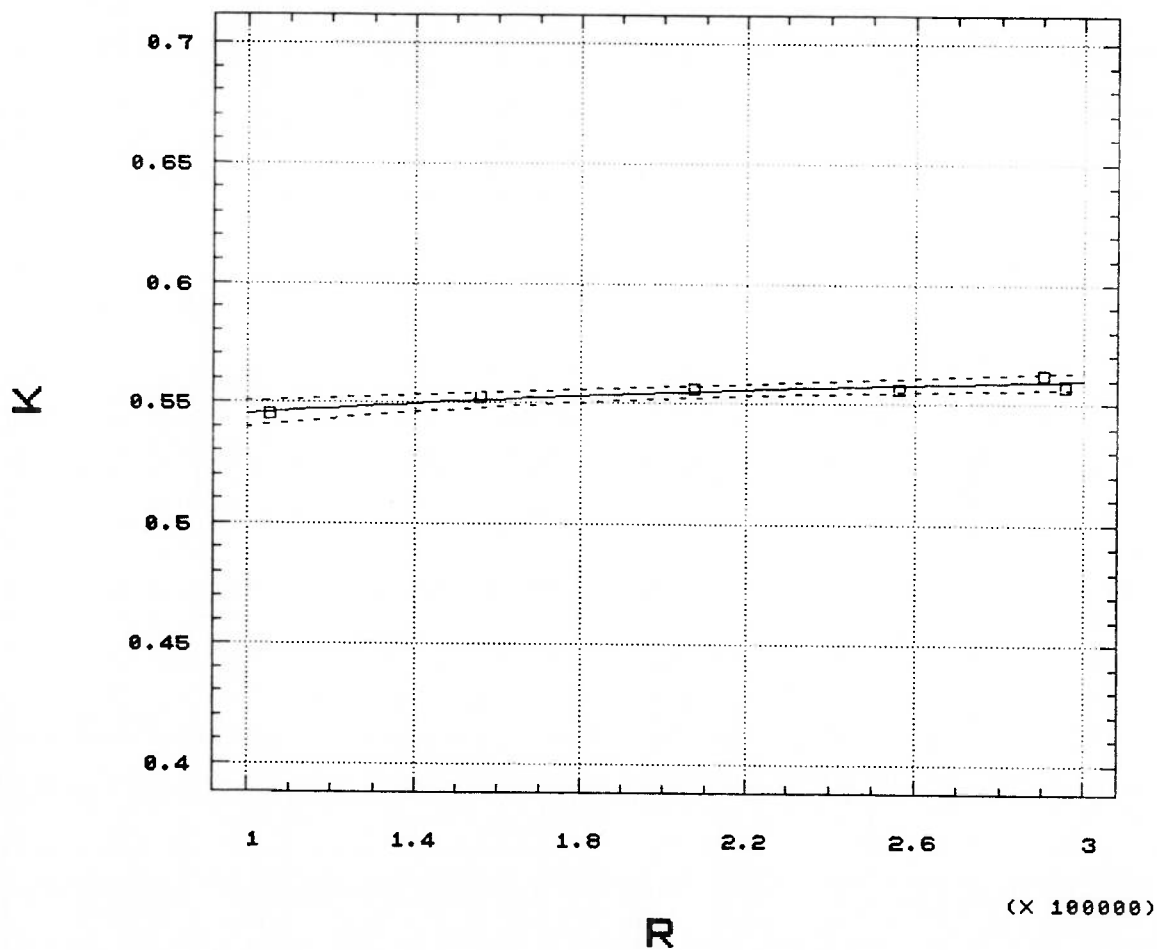
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 67 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 B.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$



## PROTOTIPO MULTIFUROS 3C

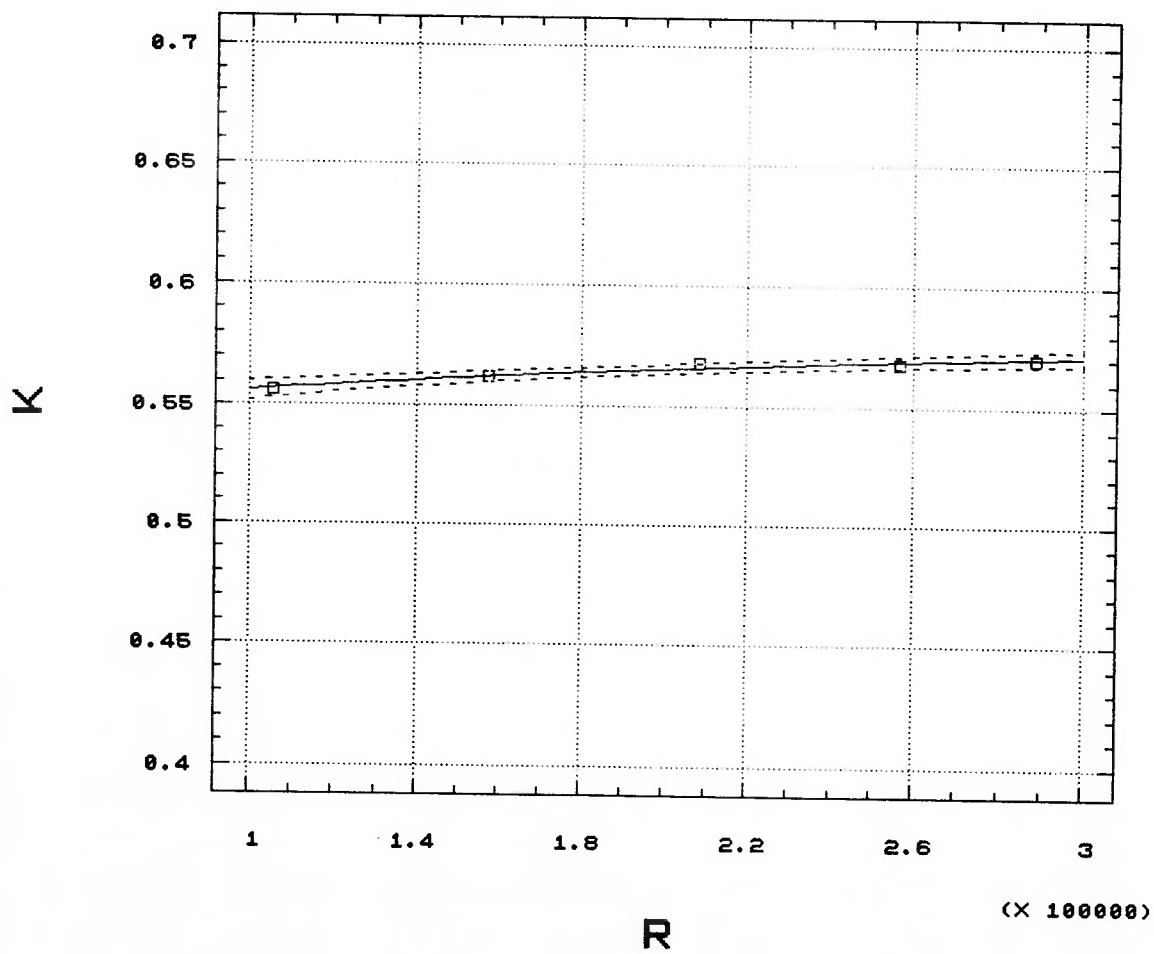
Regressão tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 68 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 3 C.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## PROTOTIPO MULTIFUROS 4A

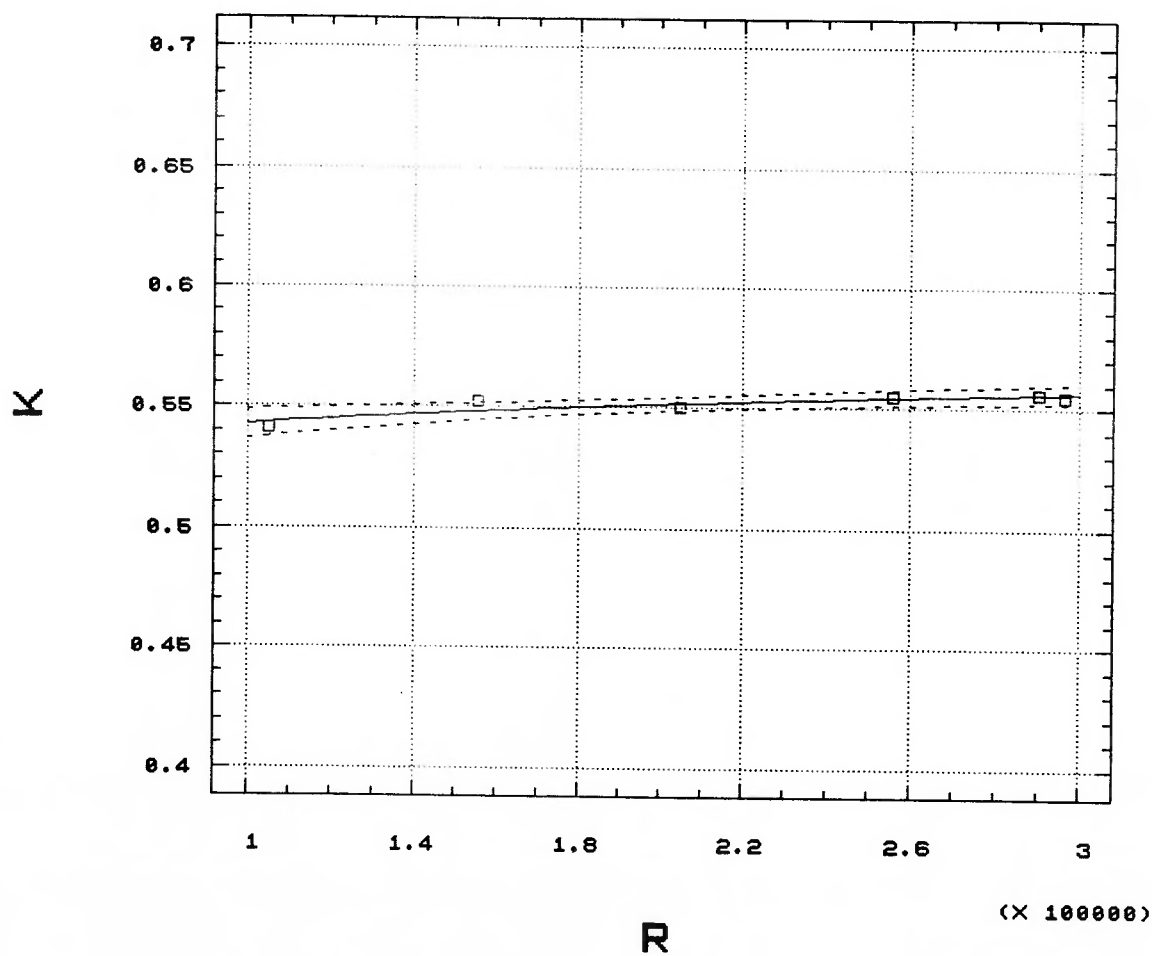
Regressão tipo:  $K=a*R^b$  ( $R > 100.000$ )

Figura 69 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 A.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

PROTOTIPO MULTIFUROS 4B (med.06124)

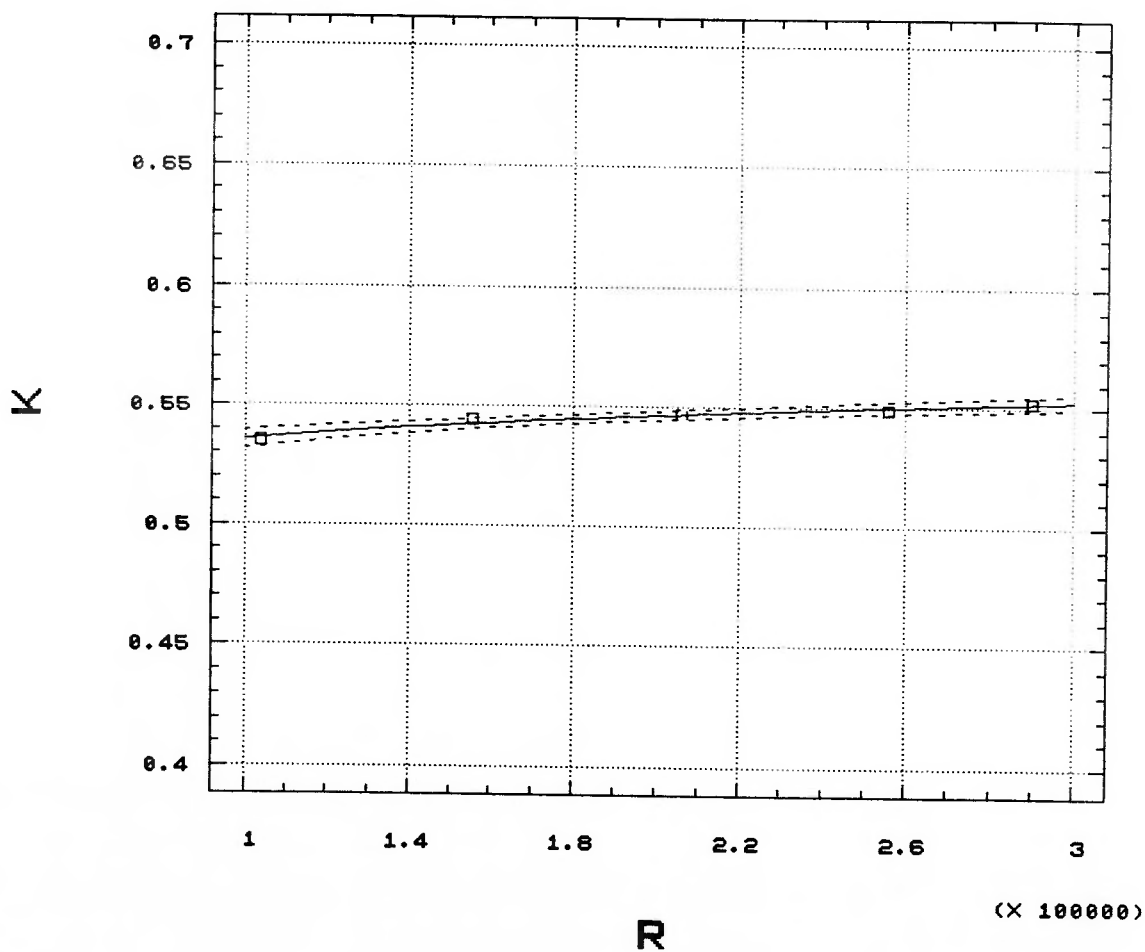
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 70 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 06124.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

PROTOTIPO MULTIFUROS 4B (med. 13124)

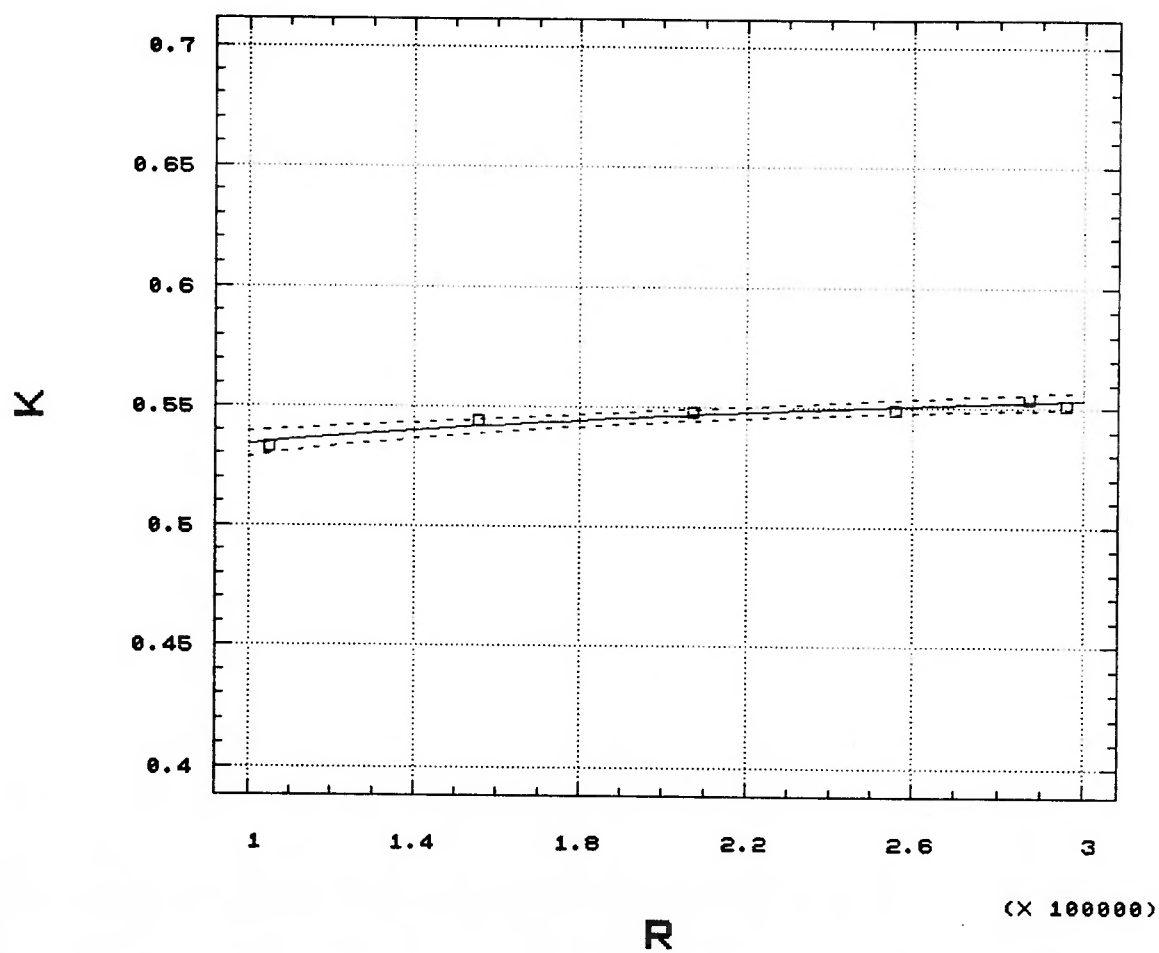
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 71 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med. 13124.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

PROTOTIPO MULTIFUROS S 4B (med.05015)

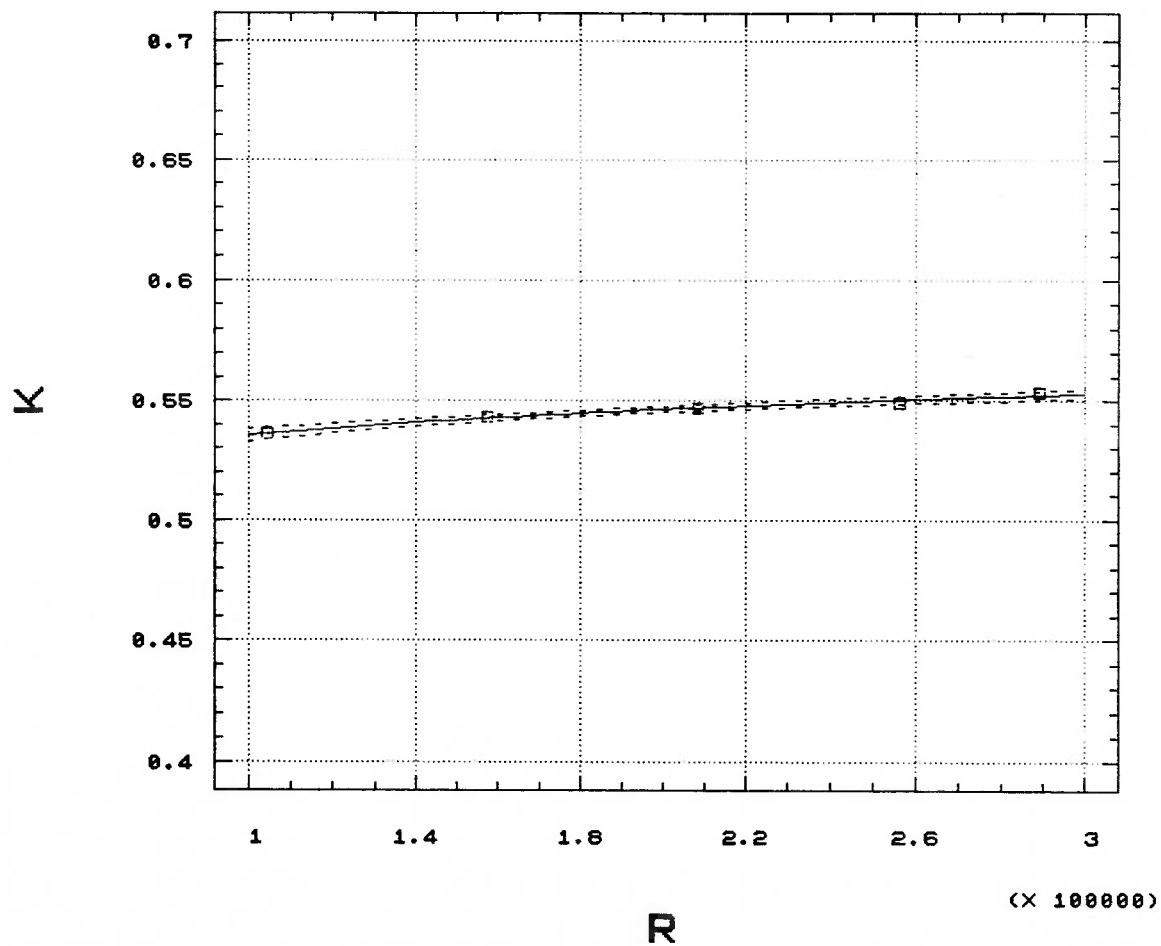
Regressao tipo:  $K=a*R^b$  ( $R>100.000$ )

Figura 72 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - protótipo 4 B - med.05015.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## MEDIDOR ANNUBAR ANR 75 - DIETERICH

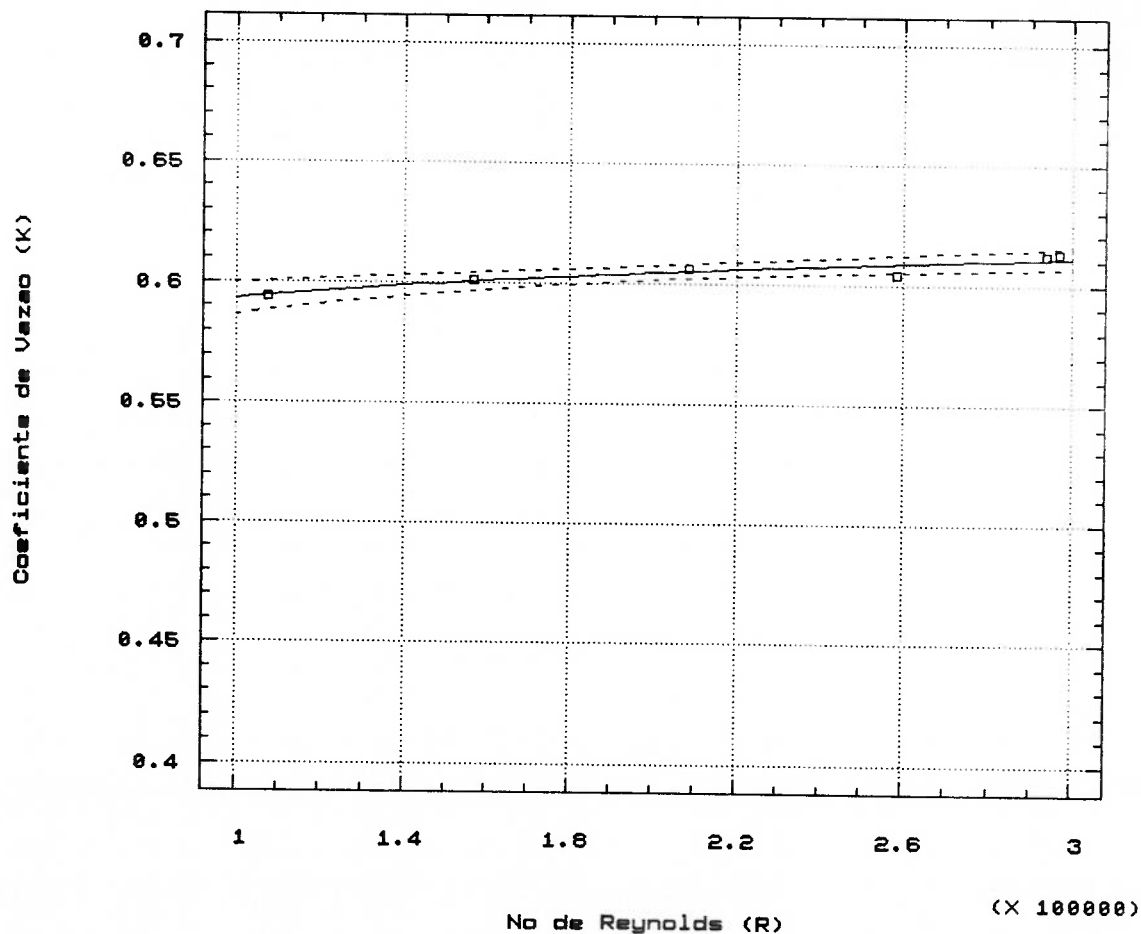
Regressão tipo:  $K = a \cdot R^b$  ( $R > 100.000$ )

Figura 73 - Coeficiente de vazão (K) em função de Reynolds (R) - Annubar - ANR 75.

Faixa:  $1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$

## 7.2. Determinação de intervalos de variação para valores médios de K

Conforme apresentado por BRITTON; MESNARD (1982), o intervalo de variação do coeficiente de vazão para uma determinada faixa de Reynolds, avalia a possibilidade de utilizar o valor médio de K, para o cálculo da vazão, nesta faixa de R. Este intervalo, também chamado de limite de exatidão, representa a variação percentual de K em relação ao seu valor médio. Trata-se de um parâmetro que auxilia a comparação entre os resultados dos protótipos, indicativo da dispersão dos valores em torno do K médio.

Os cálculos completos para o coeficiente de vazão estão apresentados no anexo E. A tabela 24 resume os resultados obtidos.

Protótipo	Intervalo de variação para K		
	$3 \times 10^4 < R < 8,5 \times 10^4$	$1 \times 10^5 < R < 3 \times 10^5$	$3 \times 10^4 < R < 3 \times 10^5$
1A	±3,6%	±4,1%	±8,6%
1B	±3,6%	±3,7%	±8,1%
2A	±4,9%	±4,1%	±9,4%
2B	±3,3%	±3,7%	±7,0%
2C	±6,0%	±3,0%	±9,2%
2D	±4,4%	±3,0%	±7,5%
2E	±5,6%	±2,6%	±8,5%
3A	±5,0%	±1,9%	±7,3%
3B	±5,1%	±1,6%	±6,6%
3C	±4,9%	±1,3%	±6,9%
4A	±5,0%	±1,4%	±6,6%
4B (m.06124)	±3,4%	±1,6%	±5,2%
4B (m.13124)	±5,4%	±1,9%	±7,4%
4B (m.05015)	±5,1%	±1,6%	±6,9%
ANR 75	±6,5%	±1,6%	±8,4%

Tabela 24 - Intervalo de variação para o coeficiente de vazão (K) em relação ao seu valor médio para vários intervalos do número de Reynolds (R).

### 7.3. Avaliação da vazão em seção com perfil de velocidades assimétrico

A simulação da medição de vazão com alguns protótipos instalados na seção de testes, onde a distribuição de velocidades era assimétrica, foi realizada. O comportamento do perfil de velocidades está apresentado no anexo C.

Os valores medidos e calculados estão apresentados nas tabelas do anexo F.

O valor absoluto da diferença percentual encontrada entre os valores de vazão medidos com o multífuro e com a placa de orifício foi calculado. A média destes valores para as quatro condições de vazão, ensaios nº 5, 6, 8 e 10, está apresentada na tabela 25 que segue. No cálculo da vazão com o multífuro foram usados os valores do coeficiente de vazão ajustados pelas equações das tabelas 22 e 23, obtidos para escoamentos com distribuição simétrica de velocidades.

PROTÓTIPO	$ (Q_{placa}-Q_{mult})/Q_{placa} $ K da tabela 22	$ (Q_{placa}-Q_{mult})/Q_{placa} $ K da tabela 23
1 A	1,9 %	1,7 %
1 B	1,6 %	1,6 %
2 E	1,8 %	0,7 %
3 B	1,7 %	0,7 %
4 A	1,9 %	0,5 %
4 B	1,6 %	0,9 %
ANR 75	1,7 %	0,3 %

Tabela 25 - Média dos valores absolutos das diferenças entre os valores de vazão medidos com o multífuro e com a placa de orifício para perfil de velocidades assimétrico.



#### 7.4. Estimativa de perda de carga para os protótipos

Foi realizada uma estimativa da perda de carga para os protótipos, na condição de vazão máxima, isto é com  $R$  da ordem de 300.000. Ela está apresentada na tabela 26 em valores de pressão.

Protótipo	Perda de carga multifuros	Perda de carga placa de orifício
1	156 Pa	4700 Pa
2	166 Pa	4700 Pa
3	249 Pa	4700 Pa
4	254 Pa	4700 Pa

Tabela 26 - Estimativa da perda de carga para os protótipos multifuros comparada a valores para a placa de orifício. Estimativa em valores de pressão

#### 7.5. Comparação do diferencial de pressão entre multifuros e Pitot

Uma comparação aproximada entre as pressões diferenciais apresentadas pelos protótipos dos multifuros e por um tubo de Pitot padrão localizado na posição de velocidade máxima (Y6), em mesmas condições de vazão, obteve os resultados descritos a seguir.

Para baixos valores de vazão, com valores de velocidade em torno de 3,5 m/s, os protótipos de seção circular apresentaram pressão diferencial (DP) 30% maior e os de seção octogonal tiveram valores 50% maior que a correspondente medida com Pitot.

Para valores de velocidade média entre 4,5 e 7,0 m/s, os modelos de seção circular apresentaram valores de DP entre 50 e 60% maior que o Pitot, e o octogonal entre 70 e 85% maior.

Por fim, nos testes com velocidades entre 9 e 34 m/s ( $R > 10^5$ ), a vantagem dos multífuros sobre o Pitot indicou valores de **DP** entre 60 e 70% maior para medidores de seção circular, e entre 90 e 100% para modelos com seção transversal octogonal.

## 8. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

### 8.1. Análise dos resultados avaliando influências de características construtivas.

A análise dos resultados obtidos para os diferentes modelos de protótipos foi feita a partir dos seguintes parâmetros:

- a qualidade do ajuste dos pontos ( $K \times R$ ) obtidos para uma função, avaliada a partir de sua incerteza e de seu coeficiente de correlação.
- a amplitude do intervalo de variação de  $K$  em torno de seu valor médio, para uma determinada faixa de Reynolds.
- a incerteza global associada aos valores do coeficiente de vazão obtidos, em torno de 2%.

Para a geometria externa dos protótipos, observando os resultados do intervalo de variação de  $K$ , para a faixa toda de  $R$  e para valores maiores que  $10^5$ , os medidores com seção transversal octogonal tiveram melhores resultados, com menores intervalos de variação. Porém, para  $R < 10^5$  os modelos com perfis circulares foram ligeiramente superiores, apresentando valores menores para amplitude de variação de  $K$ .

Analisando as equações obtidas com as regressões, para faixa total de Reynolds, os medidores de característica circular tiveram seus pontos experimentais melhor ajustados que os octogonais. Considerando apenas os resultados para  $R > 10^5$ , as duas geometrias tiveram resultados próximos.

A adoção de 4 orifícios para avaliação da pressão de esteira mostrou-se vantajosa em relação ao uso de um único furo, por oferecer um valor ligeiramente maior para a pressão diferencial. Isto pode ser observado, comparando os resultados dos protótipos 2A com 2C e de 2B com 2D, onde a única diferença é o número de furos.

Convém lembrar que o uso de mais de um orifício para avaliar a pressão de esteira, impõe que o arranjo interno do medidor seja composto por duas câmaras obtidas através de um elemento divisor.

Testes adicionais com este número de tomadas de pressão de esteira são recomendados para outras geometrias.

O emprego de duas câmaras com régua divisora comparado ao método de tubos transmissores de pressão, tanto nos protótipos de geometria octogonal como nos circulares, não produziu efeito que fosse determinante. Observação feita a partir dos resultados e de suas incertezas.

A influência do tubo interpolador pôde ser avaliada para protótipos similares. Comparando os resultados dos protótipos 1A e 1B, não observa-se diferenças, porém confrontando 2A com 2B e 2C com 2D, para Reynolds inferiores à  $10^5$ , aqueles que usaram tubo interpolador tiveram menor variação e melhor ajuste para  $K$ . Esta avaliação, contudo não foi confirmada por 2E.

Nos modelos 3 e 4, o uso do tubo interpolador não apresentou nenhum resultado superior àqueles que não o usaram, consideradas as incertezas. Mesmo a comparação entre os modelo 3A e 3C, onde a única diferença era o diâmetro do interpolador, não foi conclusiva, mas indicou vantagem para o protótipo 3C, que obteve o menor intervalo de variação entre todos, na faixa de Reynolds acima de  $10^5$ .

## **8.2. Comparação entre os desempenhos dos medidores**

Apresenta-se a seguir uma análise comparativa sobre o desempenho dos medidores nos ensaios, confrontados com os dados apresentados pelas referências bibliográficas.

Comparando, a partir do intervalo de variação de  $K$  médio, os resultados nas diferentes faixas de  $R$  temos:

- para Reynolds na faixa de  $10^4$ , os resultados destacaram-se ligeiramente os protótipos nº 1 e o 2B, com menores intervalos de variação de K. Como também, o 4B, na medição 06124, que apresentou resultados equivalentes, não confirmados pelas outras medições, o que sugere que devam ser realizados novos ensaios. Não foram encontradas na bibliografia informações sobre outros medidores testados com dados suficientes nesta faixa ( $10^4$ ), para que os valores pudessem ser comparados.
- para Reynolds,  $R > 10^5$ , os medidores com seção octogonal (3 e 4) foram mais estáveis que os circulares (1 e 2). Estes dados confirmam qualitativamente os resultados levantados na bibliografia pesquisada, para medidores similares. Conforme medidores testados por BRITTON; MESNARD (1982), onde os de geometria circular tiveram K variando entre  $\pm 7,6\%$  e  $\pm 10,4\%$ , e para octogonal  $\pm 1\%$ . Os dados do NEL (1985) apresentam para o multifuro octogonal, intervalo de variação da ordem de  $\pm 0,7\%$ , e os do CTH (1984) aproximadamente:  $\pm 2,3\%$ . Porém, quantitativamente a comparação fica um pouco prejudicada, pois os dados da bibliografia correspondem a uma faixa maior,  $10^5 < R < 10^6$ , do que aquela alcançada neste trabalho.
- Considerada a faixa total de Reynolds ( $3 \times 10^4 < R < 3 \times 10^5$ ) os vários modelos tiveram resultados próximos, sendo que aqueles de geometria octogonal obtiveram variação ligeiramente menor, com as diferenças dos resultados menores que as incertezas. Para esta faixa, também, não houve resultados que pudessem ser comparados.

Avaliando os vários medidores, a partir dos resultados das regressões

dos pontos experimentais pode-se dizer que:

- para a faixa toda de Reynolds, os pontos dos protótipos com geometria circular foram melhor ajustados pela função potência que os da

configuração octogonal, sendo pequena esta diferença na qualidade do ajuste.

- considerado valores de Reynolds maiores que  $10^5$ , todos os protótipos testados apresentaram curvas ajustadas de ótima qualidade para os pontos obtidos, sem diferenças entre os modelos diferentes. Esse aspecto favorece a utilização da curva de ajuste e não o valor médio de K, para estes sensores.

No teste de medição de vazão com perfil de velocidades assimétrico, os resultados estiveram próximos quando consideradas as incertezas. Houve uma tendência de melhor resultado dos medidores de seção octogonal quando para  $R > 10^5$  (foi adotada, neste caso a equação da tabela 23, para os cálculos). Ainda que a assimetria não fosse acentuada, os resultados foram bastante satisfatórios.

A verificação dos valores de perda de carga confirmou a vantagem dos multífuros sobre a placa de orifícios, onde no pior caso o multífuro perde 18,5 vezes menos carga.

Foi também confirmada a vantagem sobre o Pitot quanto a apresentar maiores valores de pressão diferencial para uma mesma condição de escoamento.

Nos ensaios repetidos nos protótipos 4B, uma das medições (med. 06124) teve resultado distinto das outras duas, sugerindo três causas para estas diferenças. Uma vinculada ao protótipo em si: sendo eles configurados conforme o modelo a ser testado, os detalhes de montagem que garantiam a sua composição final podem não ter sido mantidos semelhantes nos três ensaios. Outra causa, ligada ao processo de instalação do mesmo, e uma terceira associada ao procedimento de medição. A repetição de ensaios pode confirmar a melhor hipótese.

O medidor Annubar testado, que possui características semelhantes ao protótipo 3A, apresentou resultados de mesma ordem de grandeza que os modelos 3 e 4 para o ajuste de uma curva aos resultados. Para o intervalo total de R, a variação do coeficiente de vazão teve maior amplitude que a dos protótipos. Comparando com os dados de BRITTON; MESNARD (1982), consideradas as incertezas, os resultados dos ensaios não indicaram diferenças.

### 8.3. Conclusões

A partir da análise dos resultados, das informações levantadas na bibliografia apresentam-se a seguir algumas conclusões.

Geometria do corpo cilíndrico. A geometria é fator determinante no coeficiente de vazão (**K**) e representa as influências de maior ordem de grandeza. Isto ocorre pois o comportamento do escoamento em torno do cilindro é função da própria geometria e do número de Reynolds. Assim o coeficiente de vazão será alterado quando o ponto de separação da camada limite variar de posição e conseqüentemente variar o nível e as características da turbulência na parte posterior do cilindro, mudando as propriedades do escoamento. Desta forma para perfis que possuam características que impliquem a localização fixa do ponto de separação, como através da presença de arestas, obtém-se menor variação de **K**. Fato confirmado no modelo octogonal.

A semelhança entre  $C_a$  e **K** possibilita uma primeira escolha da melhor geometria para o medidor, considerando a faixa de Reynolds que será empregado. Desejando-se construir medidor com coeficiente de vazão estável deve-se pesquisar formas geométricas que apresentem pequenas variações no Coeficiente de Arrasto.

Localização e número dos furos. O perfil de velocidades na seção de medição é determinante no modo como as tomadas de pressão total estão distribuídas, podendo influir também sobre o número delas. Outro parâmetro que define o número de orifícios é o diâmetro do conduto onde será realizada a medida. Considera-se 4 (quatro) o número mínimo de orifícios dirigidos para montante e indica-se utilizar o mesmo número de furos e localização para as tomadas de pressão de esteira.

A distribuição de Chebyshev, para 4 furos, apresentou bons resultados na simulação considerada e nos ensaios experimentais realizados o perfil assimétrico, confirmando-a como boa opção posicionamento dos furos.

Arranjo físico interno do medidor. Não houve uma definição de um arranjo físico preferencial, mas a combinação das características construtivas analisadas indica a opção por um medidor com seu interior dividido em duas câmaras ( uso de régua divisora) como consequência do uso de número igual de orifícios a jusante e montante. O emprego do tubo interpolador não obteve resultado com diferença significativa aos que não o usaram, indica-se apenas, para o caso de adota-lo, dimensionar seu diâmetro com cuidado em relação às dimensões da câmara interna onde será instalado.

Ensaio com perfis com fortes assimetrias devem ser realizados para que novas informações reforcem os critérios para seleção do arranjo interno do medidor.

Comparativamente a outros medidores. O multífuros quando comparado aos medidores por pressão diferencial mais usualmente empregados para escoamento em condutos, como placa de orifício, bocal, tubo de Venturi e tubo de Pitot oferece as vantagens confirmadas neste trabalho, como reduzida perda de carga e bom diferencial de pressão (em relação ao Pitot).



#### 8.4. Comentários Finais

O tubo multifuros é alternativa interessante e sua aplicação deve considerar as características de escoamento, o sistema de condutos, a faixa de número de Reynolds e o perfil de velocidades.

Medições que exijam boa exatidão podem ser obtidas como foi verificado com os resultados para perfis de velocidade com assimetria. Indica-se nestes casos, que o cálculo da vazão seja feito com o  $K$  calculado através de uma equação de calibração, determinada para aquele medidor, e não de um valor médio para  $K$ . Caso se queira, modernos equipamentos informatizados denominados computadores de vazão, podem estar programados com os dados da curva de calibração do medidor, apresentando simultaneamente à medição, os resultados da vazão medida com alto grau de exatidão.

A partir das informações levantadas podem ser estabelecidas algumas diretrizes para o projeto de um medidor multifuros que atenda determinada aplicação com a previsão de seu desempenho.

Como resultado complementar às informações sobre os multifuros estudados, esta pesquisa concretizou uma instalação laboratorial com suas incertezas características e estabeleceu uma metodologia de testes para ensaios que pode ser aplicada à outros estudos.

As faixas de vazão investigadas oferecem dados importantes para aplicações para instalações industriais, redes de distribuição de água, e instalações de ventilação e ar condicionado.

Foram desenvolvidas técnicas para fabricação de medidores com duas câmaras, e outros componentes, com uso de materiais alternativos, resinas iso-oftálicas e fibra de vidro que podem ser aplicadas com vantagens, entre outras, de redução de custo.

Para investigação posterior da geometria externa do medidor, ficou a proposta do triângulo isósceles, e consideradas as análises feitas, sugere-se também, o estudo do uso de aletas para medidores destinados a medir escoamentos com Reynolds da ordem de  $10^4$ .

Para a continuidade deste estudo, é de grande interesse a análise do comportamento do medidor em situações adversas típicas, com perfis de velocidade distorcidos por acessórios de uso freqüente em linhas de fluidos, como curvas, válvulas.

Propõe-se, ainda, a realização de maior número de ensaios que possam apresentar seus resultados com menor margem de incertezas para investigar alguns elementos avaliados nesta pesquisa, porém sem uma conclusão definitiva, dadas as incertezas envolvidas.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ACHENBACK, E. Distribution of local pressure and skin friction around a circular cylinder in cross-flow up to  $Re = 5 \times 10^6$ . **Journal of Fluid Mechanics**. v. 34, p.625-639, 1968.
- AIR MOVEMENT AND CONTROL ASSOCIATION, INC., AMCA. **Fan Application Manuals**. Illinois, 1990.
- ALBERNETHY, R. B.; BENEDICT, R. P.; DOWDELL, R. B. ASME Measurement Uncertainty. **Journal of Fluid Mechanics**. v.107, p.161-164, Jun. 1985.
- ALLEN, C. M.; HOOPER, L. J. Piezometer investigation. **Transactions of the ASME, HYD**, v.54, n.1, 1932.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, ASHRAE. **Handbook of fundamentals**. New York, ASHRAE, 1989.
- \_\_\_\_\_. **ASHRAE Brochure on psychometry**. New York, 1972.
- AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS, ASME; BEAN, H. S., ed. **Fluid meters, their theory and application**. 6.ed. New York, 1971.
- \_\_\_\_\_. **Measurement uncertainty - Instruments and apparatus - ANSI/ASME PTC 19.1**. New York, 1985.
- ARNBERG, B. T. Practice and procedures of error calculations. In: **Symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry**, 1., Pittsburgh, May 1971. **Proceedings**. Pittsburgh, 1974. p.1267-1284

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **Medidor de vazão de fluidos - Classificação - NBR 10396**. Rio de Janeiro, 1988.
- \_\_\_\_\_. **Medidor de vazão de fluidos - Terminologia - NBR 10977**. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSY, T. M. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo, EPUSP, 1990.
- BALLENGEE, D. W.; CHEN, C. F. Experimental determination of the separation point of flow around a circular cylinder. In: Symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, 1., Pittsburgh, May 1971. **Proceedings**. Pittsburgh, 1974. p.419-427.
- BATHAM, J. P. Pressure distributions on circular cylinders at critical Reynolds numbers. **Journal of Fluid Mechanics**. v.57, p.209-228, 1973.
- BEAN, H. S. The expanding field of fluid metering. In: Flow Measurement Symposium, Pittsburgh, Pennsylvania, 1966. **Proceedings**. Pittsburgh, 1966. p.1-4.
- BENEDICT, R. P. **Fundamentals of Temperature, Pressure and Flow Measurement**. New York, John Wiley & Sons, 1969.
- BLAKE, K. A. The design of piezometer rings. **Journal of Fluid Mechanics**. v.78, pt.2, p.415-428, 1976.
- BRADSHAW, P. **Experimental fluid mechanics**. Oxford, Pergamon Press, 1964.
- BRITISH STANDARD INSTITUTE. **Measurement of fluid flow in closed conduits - BS 1042, Part 1: Pressure Differential Devices, section 1.1. Specification for square-edged orifice plates, nozzles or Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full**. London, 1984

- \_\_\_\_\_. **Measurement of fluid flow in closed conduits - BS 1042, Part 2: Velocity area methods, Section 2.1. - Method using Pitot static tubes.** London, 1983.
- \_\_\_\_\_. **Measurement of fluid flow in closed conduits - BS 1042, Part 2: Velocity area methods, Section 2.2. - Method of flow measurement of velocity at one point of a conduit of circular cross section.** London, 1984
- BRITTON, C.; MESNARD, D. **A performance summary of round-and-diamond-shaped averaging Pitot-type primaries.** *Measurement and Control*, v.15, Sept. 1982.
- BURGESS, T. H.; HERNADEZ, A. W.; HOPKINS, R. J.; FISHER & PORTER CO. **An accurate flow calibration system using combined primary and secondary standards.** In: *Symposium on Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, 2.*, St. Louis, U.S.A., Mar. 1981. **Proceedings.** St. Louis, I.S.A., 1981. v.2, p.777-787.
- CECCHI, G. C. **Error analysis of the parameter of a least-square determined curve when both variables have uncertainties.** *Measurement Science Technology.* v.2, p.1127-1128, 1991.
- CENTRO TECNOLÓGICO DE HIDRÁULICA - CTH. **Relatório de ensaio de aferição para medidor de vazão: haste de inserção sonda 4.** São Paulo, set. de 1984.
- CHEREMISINOFF, N. P., ed. **Flow phenomena and measurement.** Houston, Golf Publishing, 1986. (Encyclopedia of Fluid Mechanics v.1.)
- CHO, S. H.; BECKER, H. A. **Response of static pressure probes in turbulent streams.** *Exp. Fluids.* V.3, n.2, p.93-102, 1985.

- CHRISTIANSEN, J. E.; FRENCH O. C. Characteristics of transverse Pitot tubes. **Agricultural Engineering**. v.18, p.21-24, 1937.
- COLE, Edward S. Pitot-tube practice. **Transactions of the ASME, HYD**, v.5, n.8, p.220-222, 1935.
- COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo, Edgard Blücher, 1977.
- CURRIE, I. G. **Fundamental mechanics of fluids**. New York, McGraw Hill, 1974.
- DACHS, J. N. W. **Análise de dados e regressão**. Campinas, IMECC, Universidade Estadual de Campinas, 1978.
- DAUGHERTY, R.; FRANZINI, J. B. **Fluid mechanics with engineering applications**. New York, McGraw Hill, 1977.
- DELANY, N. K.; SORENSON, N. E. Low speed drag of cylinders of various shapes. **NACA TN 3038**. 1953.
- DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão**. São Paulo, Edgard Blücher, 1983.
- DIETERICH STANDARD CO. **Annubar flow handbook**, Boulder, 1982.
- \_\_\_\_\_. **Annubar catalog**, Boulder, 1976.
- DOIG, I. D.; ROSE, D. W. Transverse tube as Pitot tube in cylindrical conduits. **Mechanical and Chemical Engineering Transactions: Institution of Engineers**. Australia, v.MC5-MC8, p.25-30, 1969.
- DUCRUET, C.; DYMENT, A. The pressure-hole problem. **Journal of Fluid Mechanics**. V.142, p.251-267, May 1984.

- FAGE, A. The estimation of pipe delivery form Pitot tube measurement. **Engineering**. v.145, p.616-617, 3 Jun. 1938.
- FOLSOM, R.G. Review of the Pitot tube. **Transactions of the ASME**, v.78, n.7, p.1447, Oct. 1956.
- FOX, R. W.; MACDONALD, A.T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 3.ed. Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1988.
- GENSHENG, Y.; CHANGCHUN, S. Intercomparisons between standard water-and-gas flowrate facilities using orifice plates. In: Symposium on Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, 2., St. Louis, U.S.A., Mar. 1981. **Proceedings**. St. Louis, I.S.A., 1981. v.2, p.861-867.
- GIBBINGS, J. C. Numerical experiment on measured velocity distributions of turbulent pipe flow. **Aeronaut. Journal**. v.84, n.839, p.434-440., 1980.
- GOLDSTEIN, R. J. **Fluid mechanics measurement**. Hemisphere Publishing, 1983.
- GROVE, A.S.; SHAIR, F.H.; PETERSEN, E.E.; ACRIVOS, A. **An experimental investigation of the steady separated flow past a circular cylinder**. **Journal of Fluid Mechanics**. v.19, part 1, p.60-8, 1963.
- HEAD, V.P. Improved expansion factors for nozzles, orifices and variable area meters. **Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME**. v.96, n.2, Jun. 1974.
- HELENE, O. A. M.; VANIN, V. R. **Tratamento estatístico de dados em física experimental**. São Paulo, Edgard Blücher, 1981.

- HICKMAN, W. H.; BROOKS, Ed. **Investigation of the properties of the Annubar, a Flow Measurement Probe.** ASME publication at winter meeting, July 1975.
- HILLS, J.H. Investigation into the suitability of a transverse Pitot tube for two phase flow measurements. **Chemical Engineering Research and Design.** v.61, n.6, p.371-376, Nov 1983.
- HINZE, J.O. **Turbulência, An introduction to its mechanism and theory.** New York, McGraw Hill, 1959
- HOLMAN, J.P.; AJDA, W.J. **Experimental methods for engineers.** 5.ed. New York, John wiley & Sons, 1989.
- HUBBARD, C.W. Investigation of errors of Pitot tubes. **Transactions of the ASME.** Aug. 1939.
- HURANT, T. **Statistical Techniques for Dynamic Flow Measurement Evaluation.** In: Flow Measurement Symposium, Pittsburgh, Pennsylvania, 1966. **Proceedings.** Pittsburgh, 1966. p.223- 231.
- INMETRO, M. I. C. **Vocabulário de metrologia legal.** Portaria n. 155, de 02 de dez. 1986
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Measurement of fluid flow by means of orifice plates, nozzles and Venturi tubes inserted in circular cross-section conduits running full - ISO 5167 - Part 1.** 1991.
- \_\_\_\_\_. **Methods of measurement of fluid flow - evaluation of uncertainty - ISO 5168.** 1990.



- \_\_\_\_\_. **Thermal environments - Instruments and Methods for measuring quantities - ISO 7726.** 1985.
- KAWAKITA, K.; PEREIRA, M. T. Projeto de um laboratório para aferição de medidores de vazão de gás. In: Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão, 1, São Paulo, 1989. **Anais.** São Paulo, 1989. p.95-104.
- KINGHORN, F. C.; MACKAY, A.; HARRISON, P. The new United Kingdom primary standards for water flow rate measurement. In: Symposium on Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, 2., St. Louis, U.S.A., Mar. 1981. **Proceedings.** St. Louis, I.S.A., v.2, p.761-776, 1981.
- KINGHORN, F. C.; MCHUGH, A.; DUCAN, W. **Accuracy of air flowrate measurements using Pitot transverse and orifice plates.** Glasgow, U.K., NEL, July 1972. (NEL Report n.518)
- \_\_\_\_\_. An Experimental comparison of two velocity area numerical integration techniques. **Water Power.**, v.25, n.9, p.330-335, sept. 1973.
- KLEIN, Review turbulent developing pipe flow. **Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME.** v.103, n.2, p.243-249, June 1981.
- LAWFORD, V. N. Differential- pressure instruments: the universal measurement tools. **Instrumentation Tecnology.** Dec. 1974.
- MARIANI, A. L. C.; PIMENTA, M. M. Evolução do medidor de vazão instantânea tubo múltifuros. In: Encontro Nacional de Ciências Térmicas, V, **Anais.** São Paulo, dez. 1994. p. 245-248.

- MAZUREK, S. Four-orifice linear liquid mass flow-meter. In: FLOMEKO, 3rd. Conf of the IMEKO, Tech. Comm. on Flow Measurement - TC9, **Preprints**. A. Szilvássy (ed.), Budapest, Hungary, Akademiai Kiado, 1983, p. 195-200.
- MILLER, R. W.; KNEISEL, O. A comparison between orifice and flow nozzle laboratory data and published coefficients. **Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME**. v.96, n.2, June 1974.
- MILLER, R. W. **Flow measurement engineering handbook**. 2.ed. New York, McGraw Hill, 1989.
- MIT, GAS TURBINE LABORATORY. **Aerodynamic measurements**. Boston, The MIT Press, 1963.
- NATIONAL ENGINEERING LABORATORY - NEL. **Test report of Annubar flowmeter**. Glasgow, Jun. 1985.
- NERI, F.; PATANE, S.; SAITTA, G. Error-affected experimental data analysis: application to fitting procedures. **Measurement Science Technology**. v.1, p.1007-1010, 1990.
- NIELSEN, L. E. Uncertainty in automated Pitot-static tube velocity measurements. In: Symposium on Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, 2., St. Louis, U.S.A., Mar. 1981. **Proceedings**. St. Louis, I.S.A., 1981. v.2, p.683-693.
- NUNES, M. Câmara de bocais para ensaio de ventiladores - ensaio e projeto. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, IX, Florianópolis, 1987. **Anais**. Florianópolis, 1987. p.287-290.

- ORTIZ, J. P. **Estrutura e resolução de pressões flutuantes - sua análise randômica na base do ressalto hidráulico.** São Paulo, 1989. 2v. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- OWER, E.; PANKHURST, R. C. **The measurement of air flow.** 4.ed. Oxford, Pergamon Press, 1966.
- PEREIRA, M. T. **Desenvolvimento de um Venturi Sônico como padrão para medição de vazão.** Dissertação de Mestrado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1990.
- \_\_\_\_\_. **Medição de vazão de líquidos. Uso racional de energia na indústria - Procedimentos de medição - n.3,** IPT, São Paulo, 1989.
- \_\_\_\_\_. **Normalização de medidores de vazão.** In: **Simpósio Brasileiro de Medição de Vazão, 1,** São Paulo, 1989. **Anais.** São Paulo, 1989. p.155-159.
- PIMENTA, M. M. **Introdução à dinâmica dos gases.** São Paulo, EPUSP, 1981
- PLACHE, K. O. **Annubar Averaging Applied to Flow Measurement.** In: **Symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, 1.,** Pittsburgh, May 1971. **Proceedings.** Pittsburgh, 1974. p.497-500.
- POWE, R. E.; TOWNES, H. W. **Turbulence structure for fully developed flow in rough pipes.** **Journal of Fluids Engineering - Transactions of the ASME.** v.95, n. 2, p.255-262, June 1973.
- PRANDTL, L.; TIETJENS, O.G. **Applied hydro and aeromechanics.** Trad. de J. P. Hertog. New York, Dover Publications, 1934.

- \_\_\_\_\_. **Fundamentals of hydro and aeromechanics.** Trad. de J. P. Hertog. New York, Dover Publications, 1934.
- PREOBRAZHENSKI, V. P. **Mediciones termotécnicas y aparatos para efetuarlas.** Trad. de A. I. Samojvalov. Moscou, Editorial Mir, 1980. v.2.
- PRESTON, J. H. The three-quarter radius Pitot tube flow meter. **The Engineer.** p.400-402, 27 Oct. 1950.
- PROSCHAN, F. Rejection of outlying observations. **American Journal of Physics.** v.21, n.7, p.520-525, Oct. 1953
- PURSLEY, W.C. **Basic metering concepts and terms.** In: Three day course on flow measurement. São Paulo, 1994.
- RAHMEYER, W.; BRITTON, C. L. Development of averaging type Pitot-probe for discharge measurements. In: International Instrumentation Symposium, 27th., Indianapolis, 1981. **Proceedings.** Research Triangle Park, U.S.A., ISA, 1981, p.545-549.
- RIVAS JR., M. A.; SHAPIRO, A. H. On the theory of discharge coefficients for rounded-entrance flowmeters and venturis. **Transactions of the ASME.** Apr. 1956.
- ROCHA JR., J.G.P.; CARVALHO, C. A.; TAUE, N.; BREUER, P. **Programa carta psicrométrica (para computador PC).** EPUSP, São Paulo, 1990.
- ROSHKO, A. Experiments on the flow past a cilinder at very high Reynolds number. **Journal of Fluid Mechanics.** v.10, p.345-356, 1961.
- ROUSE, H. **Engineering hidraulics.** New York, Wiley and Sons, 1967.

- SABESP - COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Pitometria - A aplicação em sistemas de abastecimento de água.** São Paulo, SABESP, 1982
- SCHLICHTING, H. **Boundary-layer theory.** 7.ed. New York, McGraw Hill, 1976
- SENOO, Y.; KITA, Y.; OOKUMA, K. Measurements of two dimensional periodic flow with a Cobra probe. **Journal of Fluid Engineering - Transactions of the ASME.** v. 95, n.2, June 1973.
- SHEET METAL AND AIR CONDITIONING CONTRACTORS' NATIONAL ASSOCIATION, INC.; SMACNA. **HVAC Systems - Testing, adjusting and balancing.** Chantilly, Virginia, SMACNA, 1983.
- \_\_\_\_\_. **HVAC Systems - Retrofit of building Energy Systems and Processes.** Chantilly, Virginia, SMACNA, 1991
- SHERWOOD, T. K.; SKAPERDAS, G. T. A simplified Pitot Tube Transverse. **Mechanical Engineering.** New York, p.22-23, Jan. 1939.
- SMITH, A. J. W. **Pressure losses in duct flows.** London, Butterworth, 1971.
- SMITH, K. E.; CLARK, M. E.; ROBERTSON, J. M. Improving and understanding Pitot tube flow measurements using a transducer-microprocessor interface. In: **Symposium on Flow: Its Measurement and Control in Science and Industry, 2.,** St. Louis, U.S.A., Mar. 1981. **Proceedings.** St. Louis, ISA, 1981. v.2, p.199-207.
- SPENCER, E. A.; NEALE, L. C. The reliability of test data from flow measurement calibration laboratories. In: **Symposium on Flow, Its**

- Measurement and Control in Science and Industry, 1., Pittsburgh, May 1971. **Proceedings**. Pittsburgh, 1974. p.1255-1266
- SPENCER, E. A. The influence of the flow on flowmeter selection. In: Symposium on Flow, Its Measurement and Control in Science and Industry, 1., Pittsburgh, May 1971. **Proceedings**. Pittsburgh, 1974. p.3-12
- SPIVAK, J.A. Development of a dynamic total pressure probe for use in incompressible flows. **ISA Transaction**, v.21, n.2, 1982.
- TAKAMATSU, Y. Note on the characteristics and head shape of Cobra-type yaw meter for fixed direction measurement. **Bulletin of J. S. M. E.** v.23, n.175, p.51-59, Jan. 1980.
- TAVOULARIS, S.; SZYMCZAK, M. Displacement effect of square-ended pitot tubes in shear flows. **Exp. Fluids**. v.7, n.1, p.33-37, 1989.
- TAYLOR, J. C. Flow measurement by self-averaging Pitot-tubes. **Measurement and Control**. v.20, n.10, p. 145-147, Dec. 1987/Jan. 1988.
- TAYLOR, Sir G.I. Determination of the pressure inside a hollow body in which there are a number of holes communicating with Variable Pressures Outside. In BATCHELOR, G. K. ed. **The Scientific papers of sir Geoffrey Ingram Taylor**, v.3. Cambridge, Cambridge University Press, 1963.
- THOI, N. Q.; SOH, W. K. **On the averaging technique and the discharge coefficient of the Annubar-averaging flow sensor**. **ISA Transactions**. v. 18 (1), p.41-48, 1979
- THRASHER, L. W.; BINDER, R. C. Influence of compressibility on cylindrical Pitot-tube measurements. **Transactions of the ASME**. v.72, p. 647 Jul. 1950.

TUKEY, J. W.; MOSTELLER, F. **Data analysis and regression.** Reading, Addison-Wesley Publ. Co., 1977.

TUKEY, J. W. **Exploratory data analysis.** Reading, Addison-Wesley Publ. Co., 1977.

VENARD, J. K.; STREET, R. L. **Elementos de mecânica dos fluidos.** Trad. de Adir M. Luiz. 5.ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1978.

VIEIRA, R. C. **Atlas de mecânica dos fluidos.** São Paulo, Edgard Blücher, 1971.

WALSKI, T. Measuring differential pressure accurately in water distribution systems. **Water Engng. & Manage.** v. 131, n.11, p.28-30, Oct. 1984.

WHITE, F. **Fluid mechanics.** Tokyo, McGraw Hill Kogakusha, 1979.

\_\_\_\_\_. **Viscous flow.** New York, McGraw Hill, 1980.

WINTERNITZ, F. A. L. Cantilevered Pitot Cylinder. **The Engineer.** p.729-732, 27 May 1955.

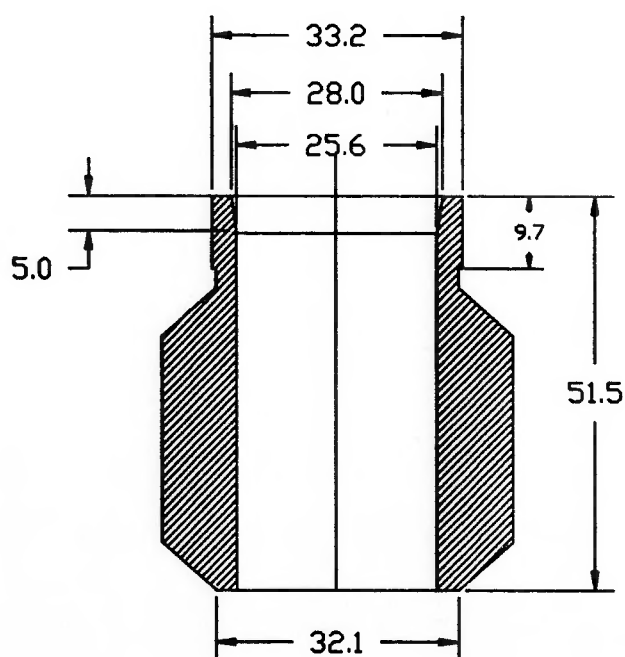
WINTERNITZ, F. A. L; FISCHL, C. F. A Simplified integration technique for pipe flow measurement. **Water Power.** v.9, p.225-234, June 1957.

**ANEXO A**

**DESENHOS DE FABRICAÇÃO DE PEÇAS PARA FIXAÇÃO DOS  
MULTÍFUROS**



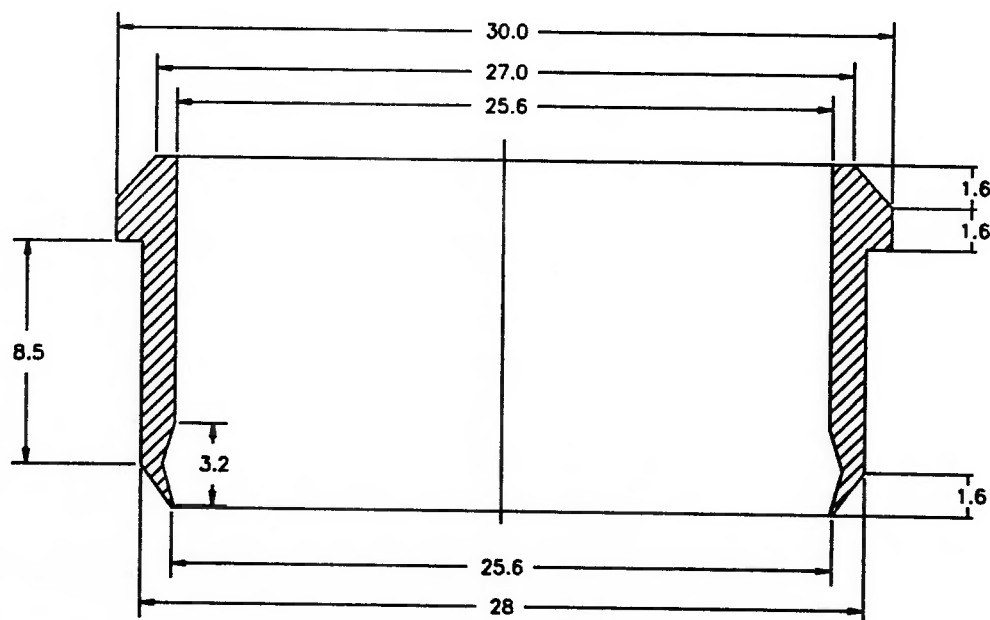
# ADAPTADOR PARA FIXACAO DOS MULTIFUROS



Medidas em mm

Figura A1

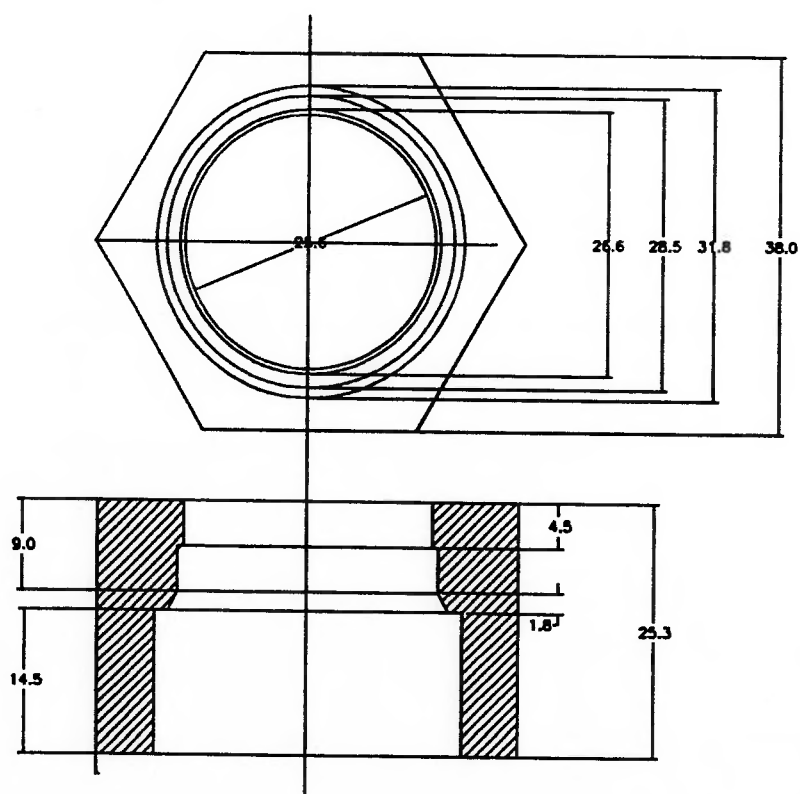
# ANILHA PARA FIXACAO DO MULTIFUROS



Medidas em mm

Figura A2

# PORCA PARA FIXACAO DO MULTIFUROS



Medidas em mm

Figura A3

**ANEXO B**

**DADOS DE CALIBRAÇÃO  
DA INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA**

ENSAIO PARA CALIBRACAO DE TERMOPARES -  
 Banho Termostatico - EPUSP (dez./93-jan.94)

## TABELA B.1.

Canal            Termopar  
 4                MF n.1  
 5                MF n.2  
 6                MF n.3  
 7                MF n.4

tp = temperatura padrao

V = leitura do termopar

tf = temperatura ambiente

digital = valor digital no computador

Canal = canal da placa A/D

tp (°C)	V(mV)	tf (°C)	digital	canal
53.90	2.80180	23.50	19761.73	4
53.90	2.80185	23.50	19761.73	5
49.35	2.55795	23.70	19782.86	4
49.35	2.55848	23.70	19782.86	5
44.23	2.28166	23.70	19795.57	4
44.23	2.27764	23.70	19795.57	5
40.25	2.07126	23.90	19794.24	4
40.25	2.07164	23.90	19794.24	5
35.85	1.86183	23.90	19793.46	4
35.85	1.86299	23.90	19793.46	5
31.82	1.62428	23.90	19796.32	4
31.82	1.62109	23.90	19796.32	5
25.30	1.27850	23.90	19799.60	4
25.30	1.27566	23.90	19799.60	5
20.73	1.04073	23.90	19799.30	4
20.73	1.03905	23.90	19799.30	5
14.85	0.76022	23.85	19809.50	4
14.85	0.74700	23.85	19809.50	5
10.30	0.52848	23.80	19809.81	4
10.30	0.51952	23.80	19809.81	5
5.10	0.26074	23.90	19791.33	4
5.10	0.25223	23.90	19791.33	5
0.58	0.02969	23.80	19792.56	4
0.58	0.03341	23.80	19792.56	5
0.40	0.02370	25.90	19913.73	6
0.40	0.07183	25.90	19913.73	7
5.10	0.26073	25.85	19902.02	6
5.10	0.30448	25.85	19902.02	7
10.30	0.52701	26.15	19901.14	6
10.30	0.56387	26.15	19901.14	7
14.90	0.76233	25.90	19895.17	6
14.90	0.78955	25.90	19895.17	7
20.10	1.02835	25.55	19859.06	6
20.10	1.04637	25.55	19859.06	7
25.25	1.29498	25.50	19822.85	6
25.25	1.30153	25.50	19822.85	7
29.81	1.54507	25.25	19805.60	6
29.81	1.54681	25.25	19805.60	7
35.05	1.82238	25.10	19804.26	6
35.05	1.81451	25.10	19804.26	7
40.40	2.10050	25.35	19810.74	6
40.40	2.07662	25.35	19810.74	7
44.85	2.33890	24.90	19803.68	6
44.85	2.30706	24.90	19803.68	7
49.91	2.61923	25.00	19816.16	6
49.91	2.57361	25.00	19816.16	7

## TABELA - B.2.

RESULTADO DA CALIBRACAO DOS TERMOPARES  
Banho termostatico EPUSP - dez./93-jan./94  
Ajuste por polinomio de 4o. grau

## Tabelas dos coeficientes para os polinomios

Termop. No.	A4	A3	A2	A1	A0
1	0.086215	-0.443861	0.407778	19.708488	-0.033666
2	0.090092	-0.397688	0.128678	20.041169	-0.006528
3	0.026694	-0.153803	0.015150	19.606084	0.002778
4	-0.094289	0.089216	0.895652	18.095584	-0.049160

## TABELA - B.3.

CALIBRACAO DOS TRANSDUTORES DE PRESSAO  
Padrao de pressao YOKOGAWA 2656 - IPT  
(dez/93; jun.94)

Ajuste por regressao linear ( $y=Ax+B$ )

Transd. No.	Canal No.	Coeficientes	
		B	A
1	0	-9.6042500000E+02	2.4076080000E+02
2	1	-3.7488757154E+01	9.3766677261E+00
3	2	-1.9524481009E+02	4.8614579029E+01
4	3	-1.9182208202E+02	4.8075709779E+01

### AVALIAÇÃO DIMENSIONAL DA PLACA DE ORIFÍCIO

Diâmetro da tubul. : 150 mm (6") nominal  
 Aparelho de medida: : Máquina de medição por coordenadas-Mitutoyo  
 Sensor : Esfera de Safira e reguas óticas

#### Medidas (todas em mm)

Referência ( ponto(0,0) ):centro do diâmetro interno

Medida do diâmetro interno: : 100.111 (10 pontos nao igualmente espaçados)  
 100.108 (10 pontos)  
 100.102 (73 pontos)

Medida do diâ. do rebaixo: 155.069 (9 pontos)  
 Centro do rebaixo: (0.055,-0.039) (0.021,-0.013,-46.284)  
 (0.017,+0.001,-46.307)

Espessura total: 8.073 (10 pontos (0.029,+0.005,-46.288)

Centro do cone: ( 0,021 -0,013 -46,284 )  
 ( 0,017 0,001 -46,307 )  
 ( 0,029 0,005 -46,288 )

Ângulos de abertura do cone: : 90:06:51 90,11417 1,572789  
 : 90:05:18 90,08833 1,572338  
 : 90:06:37 90,11028 1,572721

	Min	Max
Espessuras do rebaixo:	3,644715	3,694013
	3,651889	3,685895
	3,639384	3,698126

Tabela B4 - Resultados da avaliação dimensional da placa de orificio  
 Padrão para medição de vazão



## ANEXO C

### AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES EM VÁRIAS SITUAÇÕES

No processo de operacionalização do módulo experimental MV, foram realizadas várias medições de velocidades com tubos de Pitot na região da seção de testes onde os medidores multífuros foram ensaiados.

Nas figuras que seguem, estão representadas amostras de resultados das medições realizadas. Nestes levantamentos foram realizadas medições em onze pontos.

As figuras C1 a C8 apresentam resultados satisfatórios para a simetria, obtidos quando se realizou o processo de verificação do módulo experimental. Cada uma das figuras representa uma condição de vazão diferente. A condição crítica para a simetria sempre ocorreu nos pontos próximos à parede, posição mais sujeita a erros. A incerteza relativa global estimada foi da ordem de  $\pm 3\%$ .

As figuras C9 a C13 apresentam resultados da avaliação do perfil realizada no mesmo período em que os protótipos foram ensaiados.

O perfil de velocidades assimétrico adotado para testar os multífuros medindo vazão, foi avaliado e está apresentado nas figuras de C14 a C17.

# ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

C.1

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q1

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

$1/\text{RO} = 0.8982 \text{ (kg/m}^3\text{)}$        $\text{DPplaca} = 26.54 \text{ (mm H}_2\text{O)}$

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pa (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)	Pd (mmH2O)
2.12	2.56	2.90	3.39	3.61	3.72	3.67	3.34	2.83	2.34	1.85

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
6.1	6.7	7.1	7.7	8.0	8.1	8.0	7.7	7.1	6.4	5.7
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.07	1.04	1.01	1.01	0.99						

Placa de Orificio

Vazao Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.118

Temp. ar T3(°C)= 19.7

Vel.med.(m/s)= 6.25

Visc. Dinâmica = 1.82E-05

Vmed/Vmax = 0.773

Nº de Reynolds = 5.95E+04

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{\text{max}}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{\text{med}}/V_{\text{max}}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{\text{med}}/V_{\text{max}} = 0.8166$$

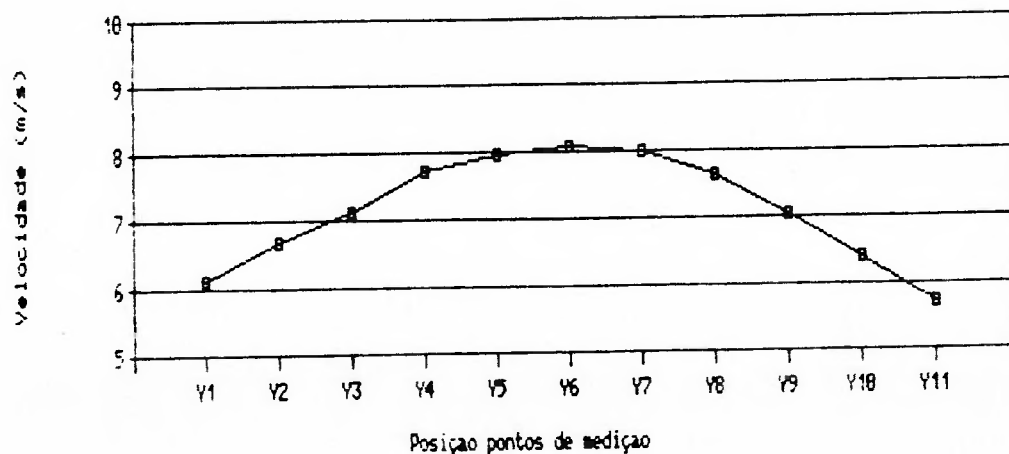


Figura C1

# ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q2

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

$1/\rho = 0.8997 \text{ (kg/m}^3\text{)}$

$DP_{placa} = 53.50 \text{ (mm H}_2\text{O)}$

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)	Pa (mmH <sub>2</sub> O)
3.8247	4.7930	5.6742	6.4101	7.0192	7.2238	7.0285	6.4175	5.4187	4.3014	3.7062

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
8.2	9.2	10.0	10.6	11.1	11.3	11.1	10.6	9.8	8.7	8.1
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.02	1.06	1.02	1.00	1.00						

Placa de Orifício

Vazao Q (m<sup>3</sup>/s) = 0.166

Temp. ar T3(°C) = 19.9

Vel.med.(m/s) = 8.74

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Vmed/Vmax = 0.774

Nº de Reynolds = 8.30E+04

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

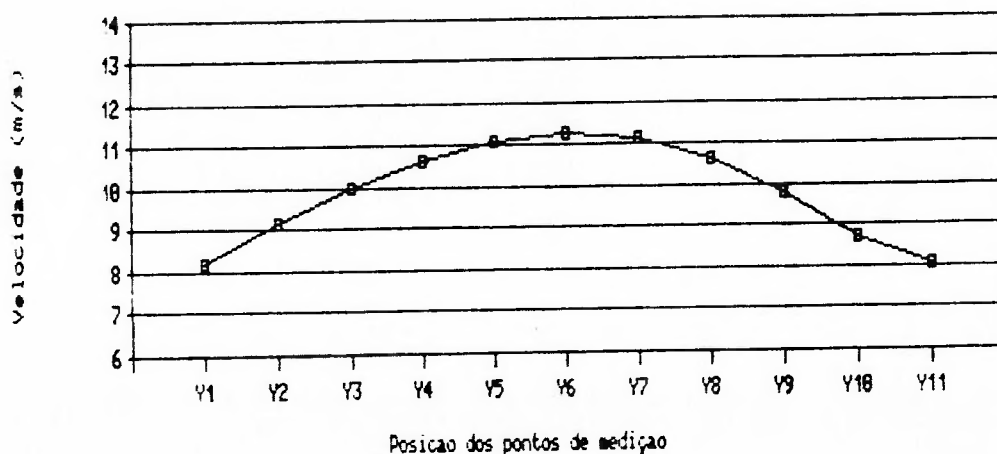


Figura C2

## ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q3

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

1/RO= 0.8994 (kg/m<sup>3</sup>)      DPplaca= 95.49 (mm H<sub>2</sub>O)

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)
6.75	7.88	9.65	11.11	12.17	12.51	12.20	11.09	9.38	7.64	6.32

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
10.9	11.8	13.0	14.0	14.6	14.9	14.7	14.0	12.9	11.6	10.6
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.03	1.02	1.01	1.00	1.00						

Placa de Orificio

Vazao Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.221

Temp. ar T3(°C)= 19.8

Vel.med.(m/s)= 11.67

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Vmed/Vmax = 0.786

Nº de Reynolds = 1.11E+05

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max.}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

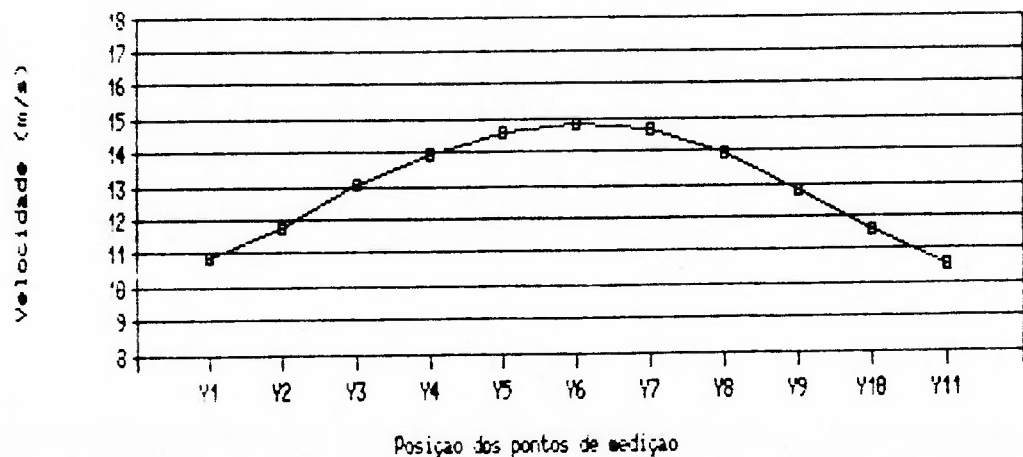


Figura C3

## ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulação de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuração modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazão Q4

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

$1/\rho = 0.8993$  (kg/m<sup>3</sup>)       $DP_{placa} = 200.84$  (mm H<sub>2</sub>O)

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
P <sub>1</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>2</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>3</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>4</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>5</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>6</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>7</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>8</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>9</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>10</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>11</sub> (mmH <sub>2</sub> O)
14.18	17.40	19.71	22.47	24.66	25.51	24.63	22.31	19.11	16.00	12.78

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
15.8	17.5	18.6	19.9	20.9	21.2	20.8	19.8	18.4	16.8	15.0
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.05	1.04	1.02	1.00	1.00						

Placa de Orifício

Vazão Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.321

Temp. ar T3(°C)= 19.7

Vel.med.(m/s)= 16.93

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Vmed/Vmax = 0.798

Nº de Reynolds = 1.61E+05

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

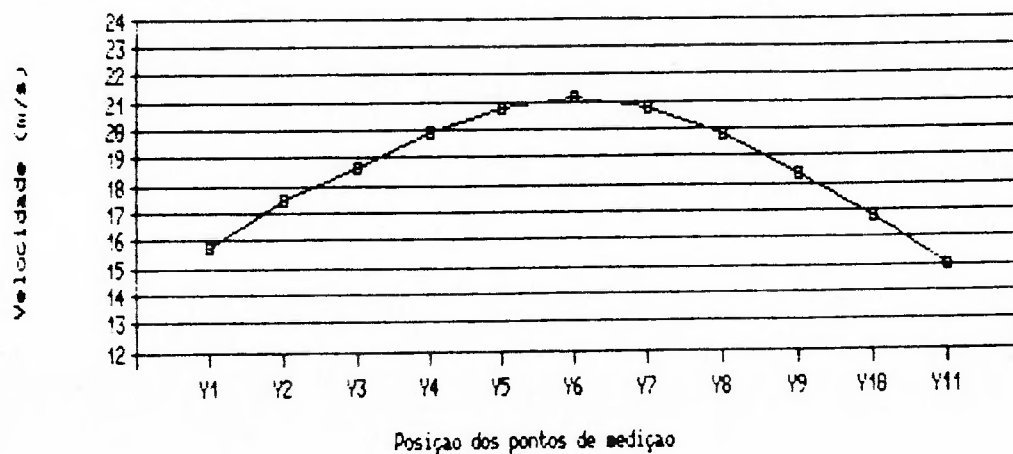


Figura C4

## ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q5

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

1/RO= 0.8993

DPplaca= 343.81

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH2)	Pd(mmH2O)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)	Pd(mmH)
24.40	28.33	33.46	37.74	41.44	42.57	41.07	37.11	31.66	27.12	21.23

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
20.7	22.3	24.3	25.8	27.0	27.4	26.9	25.6	23.6	21.9	19.3
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.07	1.02	1.03	1.01	1.00						

Placa de Orificio

Vazao Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.420

Temp. ar T3(°C)= 19.7

Vel.med.(m/s)= 22.15

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Vmed/Vmax = 0.808

Nº de Reynolds = 2.11E+05

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

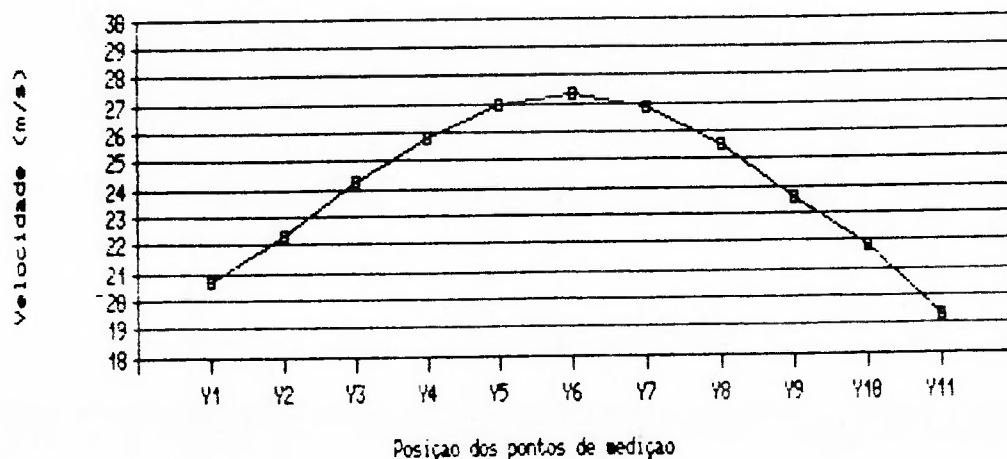


Figura C5

## ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q6

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

1/RO= 0.8974 (kg/m<sup>3</sup>)      DPplaca= 541.56 (mm H<sub>2</sub>O)

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
P <sub>1</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>2</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>3</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>4</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>5</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>6</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>7</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>8</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>9</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>10</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	P <sub>11</sub> (mmH <sub>2</sub> O)
37.46	44.67	51.90	58.31	62.43	66.08	63.62	57.69	50.37	40.93	32.31

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
25.7	28.0	30.2	32.0	33.1	34.1	33.5	31.9	29.8	26.8	23.8
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.08	1.04	1.02	1.01	0.99						

Placa de Orifício

Vazao Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.526

Vel.med.(m/s)= 27.76

Vmed/Vmax = 0.814

Temp. ar T3(°C)= 19.5

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Nº de Reynolds : 2.65E+05

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

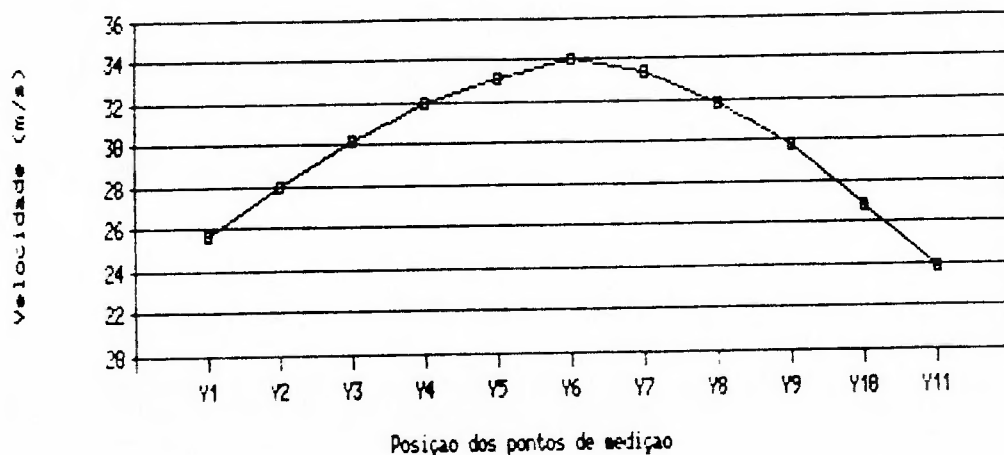


Figura C6

## ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q7

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

1/RO= 0.8985 (kg/m<sup>3</sup>)      DPplaca= 798.72 (mm H<sub>2</sub>O)

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)	Pd(mmH <sub>2</sub> O)
54.23	65.12	74.83	85.45	92.49	94.48	91.09	83.57	72.33	59.47	46.78

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
30.9	33.9	36.3	38.8	40.4	40.8	40.1	38.4	35.7	32.4	28.7
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.08	1.05	1.02	1.01	1.01						

Placa de Orifício

Vazao Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.639

Temp. ar T3(°C)= 19.4

Vel.med.(m/s)= 33.74

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Vmed/Vmax = 0.827

Nº de Reynolds = 3.21E+05

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2)/(n+1)(2n+1))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

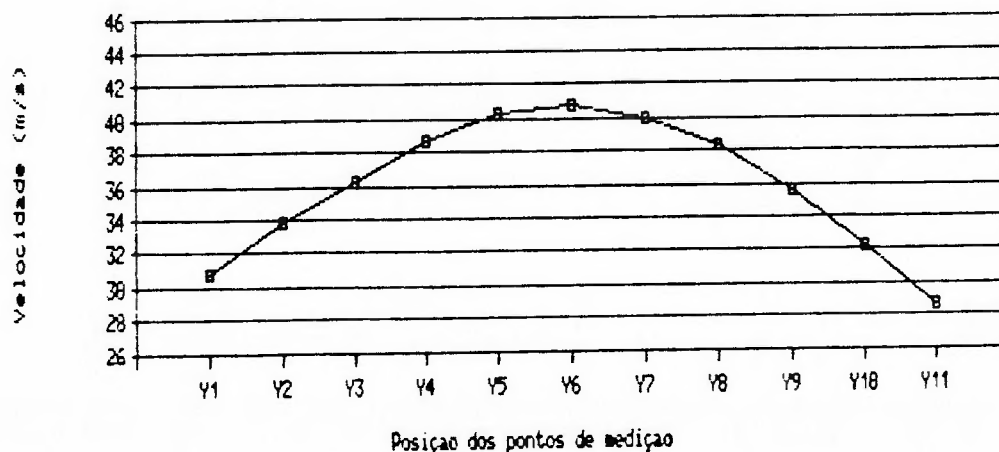


Figura C7



## ENSAIO DE AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES RESULTADOS

Condições:

Tubulacao de 150 mm conectado no ventilador através de distribuidor de escoamento

Configuracao modo A - Original (MV 1.0)

Com válvula de controle - Vazao Q8

Avaliação com Pitot de 4,8 mm

Dados aquistados individualmente - total: 50

DATA do ensaio: 15/07/94

$1/\rho = 0.8949$  (kg/m<sup>3</sup>)

$DP_{placa} = 846.90$  (mm H<sub>2</sub>O)

Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O	Pa/mmH2O
57.76	66.38	79.81	89.01	96.39	99.17	94.00	86.70	76.79	61.23	48.93

V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)	V (m/s)
31.8	34.1	37.4	39.5	41.1	41.7	40.6	39.0	36.7	32.8	29.3
V1/V11	V2/V10	V3/V9	V4/V8	V5/V7						
1.09	1.04	1.02	1.01	1.01						

Placa de Orifício

Vazao Q(m<sup>3</sup>/s)= 0.657

Temp. ar T3(°C)= 19.2

Vel.med.(m/s)= 34.67

Visc. Dinâmica = 1.82E-05 (Pa.s)

Vmed/Vmax = 0.831

Nº de Reynolds : 3.32E+05

Para Perfil Lei 1/n temos:

$$(V_i/V_{max}) = (Y_i/R)^{1/n}$$

que integrado resulta:

$$(V_{med}/V_{max}) = ((2 \cdot n^2) / ((n+1)(2n+1)))$$

Para n=7

$$V_{med}/V_{max} = 0.8166$$

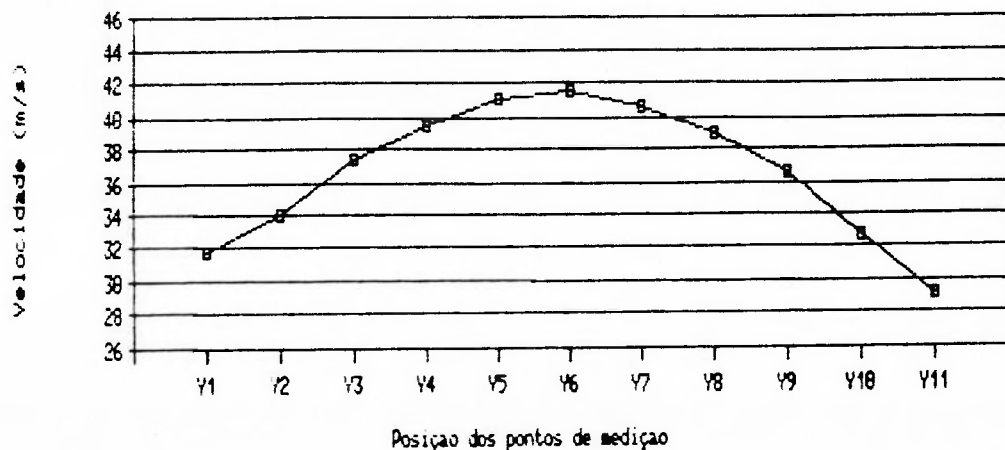


Figura C8

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4.8 mm (diam. da haste)

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e tela de nylon na entrada (MV 2.2)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 3

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.932 m<sup>3</sup>/kg

Temp. no duto: 26.4 °C

DP placa medio: 24.09 mmH<sub>2</sub>O

Nº Reynolds : 5.3E-04

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdin(mmH <sub>2</sub> O)	2.4	2.7	3.2	3.6	3.8	3.9	3.9	3.6	3.2	2.7	2.2
V(m/s)	6.61	7.04	7.61	8.08	8.31	8.45	8.41	8.09	7.69	7.05	6.40
Vi/Vn+1-i	0.97	1.00	1.01	1.00	1.01	1.00					

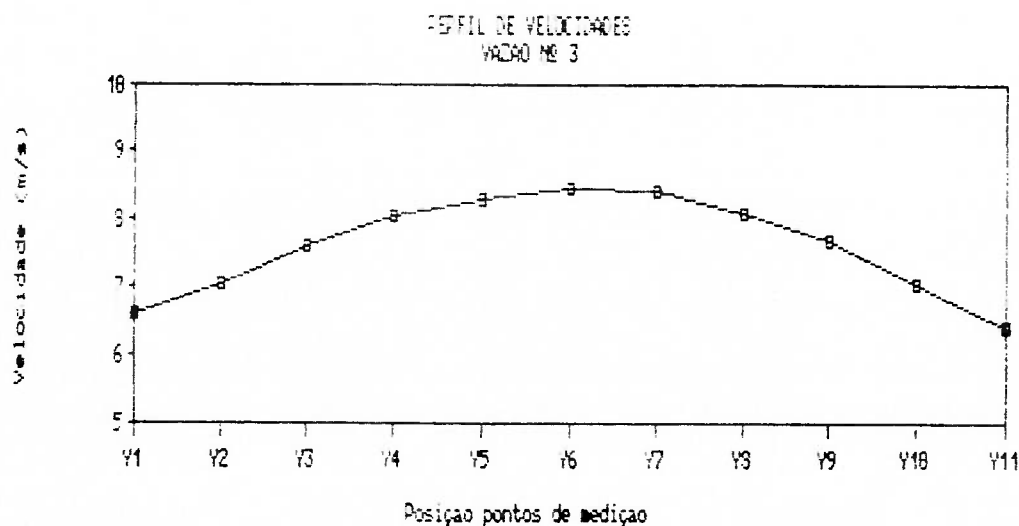


Figura C9

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste)

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e tela de nylon na entrada (MV 2.2)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 5

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.931 m<sup>3</sup>/kg  
 Temp. no duto: 26.3 °C  
 DP placa média: 60.14 mmH<sub>2</sub>O  
 N° Reynolds : 8.3E+04

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdir(mmH <sub>2</sub> O)	4.8	5.5	6.4	7.6	8.2	8.5	8.4	7.9	7.1	5.4	4.7
V(m/s)	9.32	10.01	10.80	11.77	12.24	12.46	12.36	11.99	11.34	9.92	9.20
V <sub>i</sub> /V <sub>n-1-i</sub>	0.99	0.99	1.05	1.02	1.01	1.00					

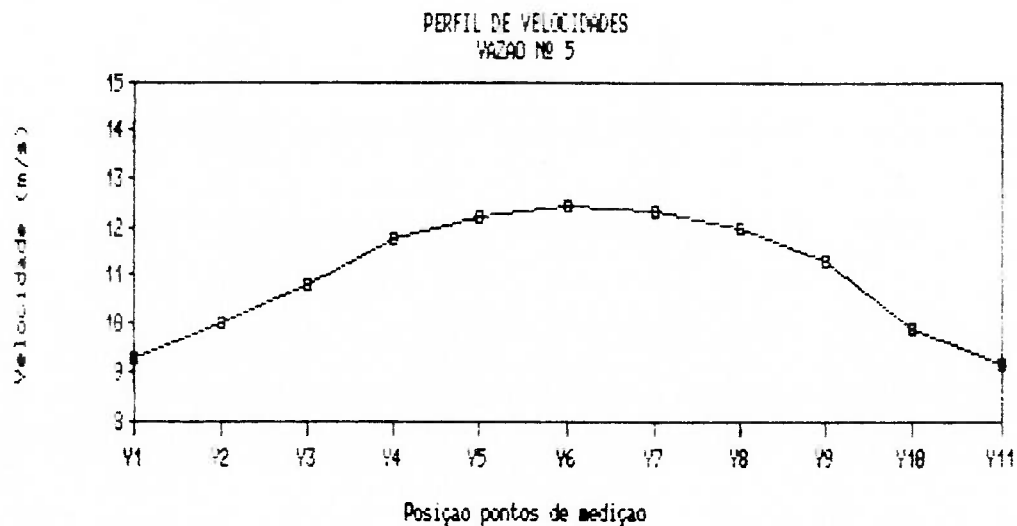


Figura C10

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste)

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e tela de nylon na entrada (MV 2.2)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 6

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.932 m<sup>3</sup>/kg

Temp. no duto: 26.6 °C

DPplaca media: 97.08 mmH<sub>2</sub>O

Nº Reynolds : 1.1E+05

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdin(mmH <sub>2</sub> O)	7.4	8.8	10.2	11.7	12.6	13.1	13.1	12.2	10.6	8.6	7.0
V(m/s)	11.6	12.6	13.6	14.6	15.1	15.5	15.4	14.9	13.9	12.5	11.3
V <sub>i</sub> /V <sub>n+1-i</sub>	0.97	0.99	1.02	1.02	1.02	1.00					

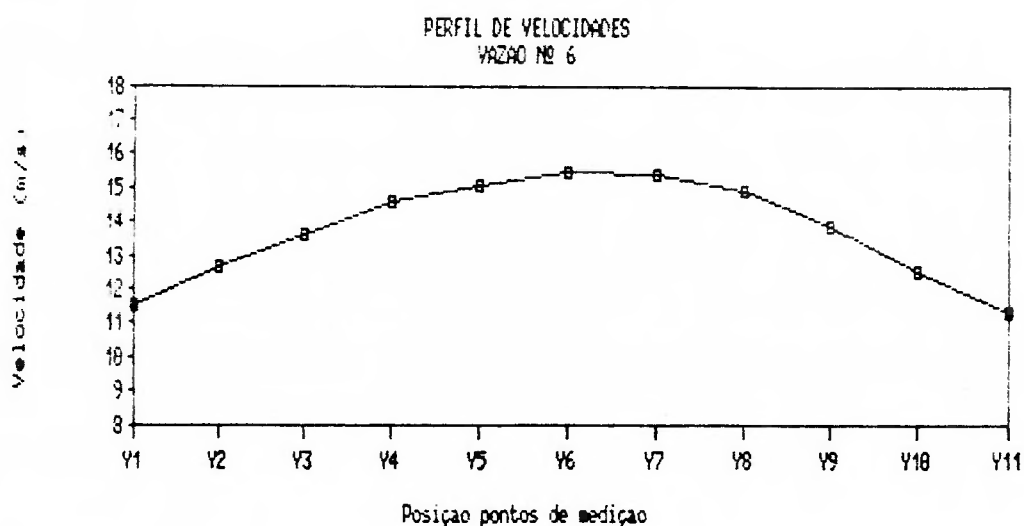


Figura C11

### AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste)

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e tela de nylon na entrada (MV 2.2)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazao do ensaio nº: 8

Obs.: medição 05015

Vol. esp médio: 0.931 m<sup>3</sup>/kg

Temp. no duto: 26.5 °C

DPplaca media: 382.88 mmH<sub>2</sub>O

Nº Reynolds : 2.1E+05

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdin(mmH <sub>2</sub> O)	26.9	31.2	36.7	41.4	45.3	47.6	47.1	43.7	38.0	31.8	23.4
V(m/s)	22.1	23.8	25.8	27.5	28.7	29.4	29.3	28.2	26.3	24.0	20.7
Vi/Vn+1-i	0.93	1.01	1.02	1.03	1.02	1.00					

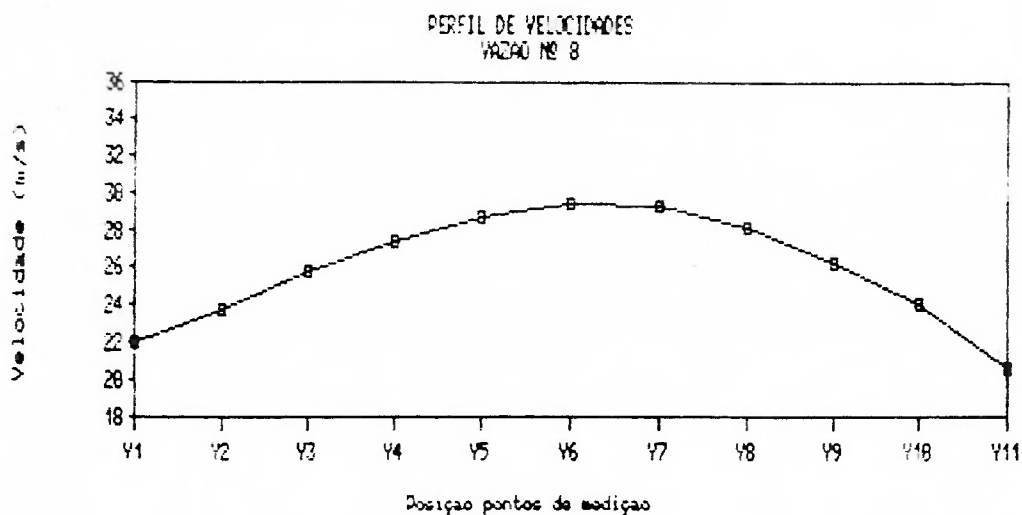


Figura C12

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste)

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e tela de nylon na entrada (MV 2.2)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 10

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.930 m<sup>3</sup>/kg

Temp. no duto: 26.4 °C

DP placa media: 796.1 mmH<sub>2</sub>O

Nº Reynolds : 2.9E+05

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdir(mmH <sub>2</sub> O)	53.8	64.3	73.8	84.3	90.4	93.8	92.2	83.2	73.5	61.4	47.6
V(m/s)	31.3	34.3	36.7	39.2	40.6	41.4	41.0	39.0	36.6	33.5	29.5
V <sub>i</sub> /V <sub>n+1-i</sub>	0.94	0.98	1.00	0.99	1.01	1.00					

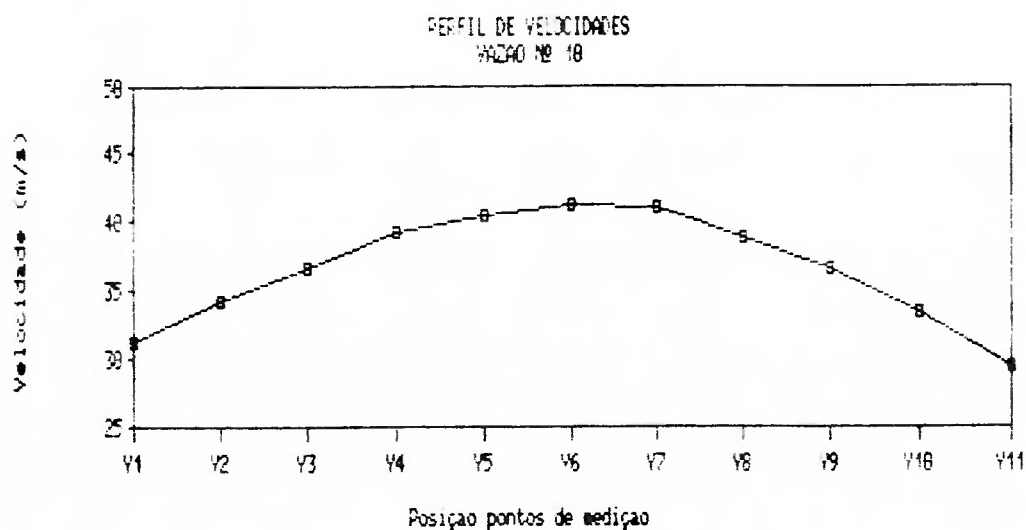


Figura C13

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES (Assimétrico)

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4.8 mm (diam. da haste).

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e placas perfuradas deslocadas do centro na entrada para deformar o perfil de velocidades (MV 2.3)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 5

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.933 m<sup>3</sup>/kg

Temp. no duto: 27.0 °C

DP placa média: 60.4 mmH<sub>2</sub>O

N<sup>o</sup> Reynolds: 8.4E+04

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
P <sub>dir</sub> (mmH <sub>2</sub> O)	4.6	5.3	6.2	7.1	8.0	8.5	8.8	8.2	7.1	5.8	4.6
V(m/s)	9.2	9.9	10.7	11.4	12.1	12.5	12.7	12.2	11.4	10.3	9.2
V <sub>i</sub> /V <sub>n+1-i</sub>	1.00	1.04	1.07	1.07	1.05						

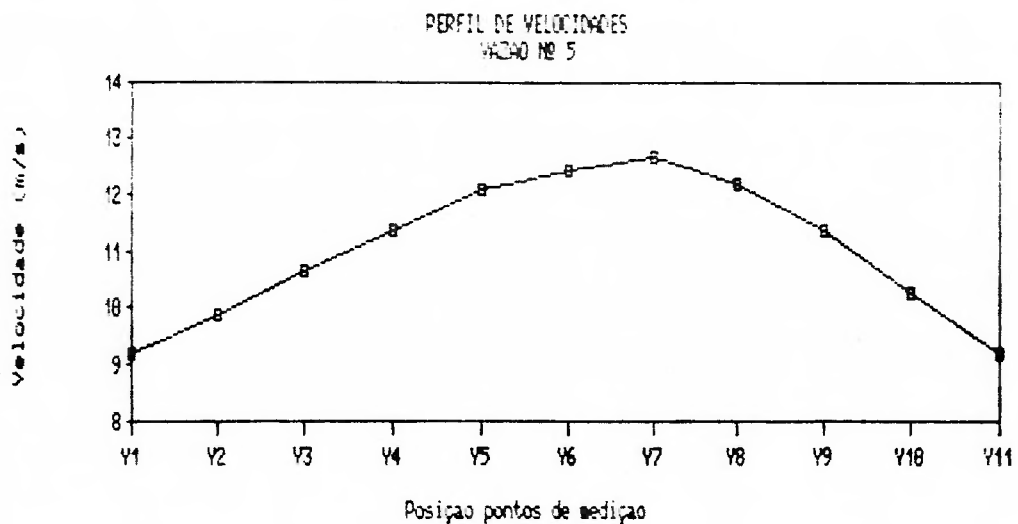


Figura C14

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES (Assimétrico)

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste).

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e placas perfuradas deslocadas do centro na entrada para deformar o perfil de velocidades (MV 2.3)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº. 6

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.930 m<sup>3</sup>/kg  
 Temp. no duto: 26.8 °C  
 DP placa media: 95.0 mmH<sub>2</sub>O  
 N<sup>o</sup> Reynolds : 1.0E+05

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdir(mmH <sub>2</sub> O)	6.8	8.0	9.3	10.6	11.8	12.9	13.6	12.7	10.9	8.5	7.1
V(m/s)	11.1	12.1	13.0	13.9	14.7	15.3	15.7	15.2	14.1	12.5	11.4
V <sub>i</sub> /V <sub>n+1-i</sub>	1.02	1.03	1.08	1.09	1.07						

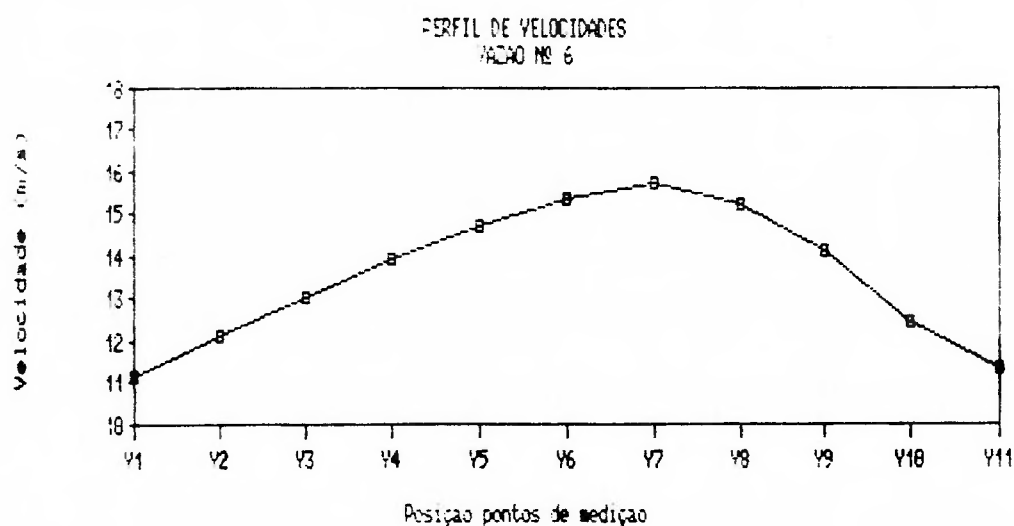


Figura C15



## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES (Assimétrico)

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste).

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e placas perfuradas deslocadas do centro na entrada para deformar o perfil de velocidades (MV 2.3)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 8

Obs.: medição 05015

Vol. esp médio: 0.931 m<sup>3</sup>/kg  
 Temp. no duto: 26.9 °C  
 DPplaca media: 380.5 mmH<sub>2</sub>O  
 N° Reynolds : 2.1E+05

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdin(mmH <sub>2</sub> O)	25.7	29.3	33.8	38.1	42.7	47.3	49.3	47.8	41.4	33.6	26.9
V(m/s)	21.7	23.1	24.9	26.4	27.9	29.4	30.0	29.5	27.5	24.8	22.2
V <sub>i</sub> /V <sub>n+1-i</sub>	1.02	1.07	1.11	1.12	1.07						

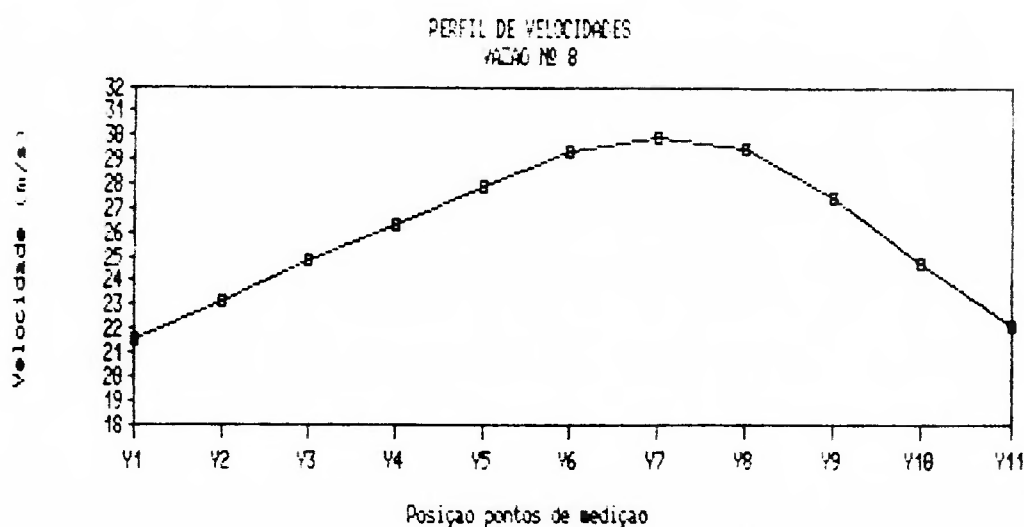


Figura C16

## AVALIAÇÃO DO PERFIL DE VELOCIDADES NA SEÇÃO DE TESTES (Assimétrico)

Instrumento utilizado: Tubo de Pitot de 4,8 mm (diam. da haste).

Configuração do módulo experimental: tubo direto no ventilador, válvula 0°, retificador, bocal e placas perfuradas deslocadas do centro na entrada para deformar o perfil de velocidades (MV 2.3)

Nº de dados para cálculo de médias: 200

Vazão do ensaio nº: 10

Obs.: medição 05015

Vol. esp. médio: 0.928 m<sup>3</sup>/kg  
 Temp. no duto: 26.4 °C  
 DPplaca media: 780.5 mmH<sub>2</sub>O  
 Nº Reynolds : 2.9E+05

Posição	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Pdin(mmH <sub>2</sub> O)	49.6	57.3	66.6	74.5	82.7	91.2	95.6	92.7	81.7	68.7	53.5
V(m/s)	30.1	32.3	34.8	36.8	38.8	40.7	41.7	41.1	38.6	35.4	31.2
V <sub>i</sub> /V <sub>n+1-i</sub>	1.04	1.09	1.11	1.12	1.07						

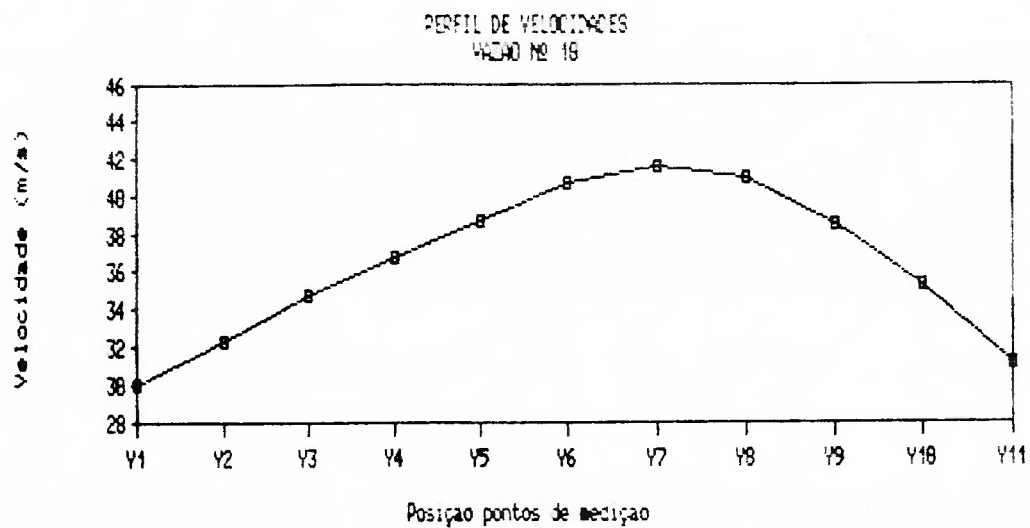


Figura C17

## ANEXO D

### EQUAÇÕES PARA O CÁLCULO DE INCERTEZAS

A estimativa das incertezas associadas às variáveis envolvidas no processo experimental utilizado no presente trabalho é realizada através de recomendações descritas nas normas utilizadas como referências, a saber ISO 5167, ISO 5168 e ANSI / ASME PTC 19.1.

No procedimento adotado serão combinadas as incertezas classificadas em dois tipos: incertezas sistemáticas e incertezas aleatórias.

Considera-se incerteza sistemática aquela que está associada ao instrumento, representando um valor que é estimado a partir de características próprias do instrumento. Não variam quando as medições são feitas sob as mesmas condições, mas podem ser influenciadas pelo valor da medição.

Incerteza aleatória está vinculada ao processo de medição, e suas características, às flutuações que ocorrem, à componentes aleatórias, etc.

Incerteza combinada, ou global, para fins práticos, é a soma quadrática das incertezas aleatórias e sistemáticas.

Notação adotada:

$\delta G \rightarrow$  Incerteza absoluta associada à grandeza G

$\frac{\delta G}{G} \rightarrow$  Incerteza relativa associada à grandeza G

**Equações para os cálculos de incertezas determinadas para as grandezas presentes no processo de medição:**

- Incerteza na determinação da vazão em volume através da placa de orifício:

$$\frac{\delta Q_{placa}}{Q_{placa}} = \left[ \left( \frac{\delta C_d}{C_d} \right)^2 + \left( \frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} \right)^2 + \left( \frac{2\beta^4}{1-\beta^4} \right)^2 \left( \frac{\delta D}{D} \right)^2 + \left( \frac{2}{1-\beta^4} \right)^2 \left( \frac{\delta d}{d} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta DP_{placa}}{DP_{placa}} \right)^2 + \frac{1}{4} \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- Incerteza de  $C_d$  (Coeficiente de descarga da placa de orifício):

Sendo  $C_d$  calculado através da equação de Stolz, a norma ISO 5167, sugere que se adote para o presente caso, onde  $\beta = 0,65$ :

$$\frac{\delta C_d}{C_d} = 0,65\%$$

- Incerteza de  $\varepsilon_1$  (Coeficiente de compressibilidade)

$$\frac{\delta \varepsilon_1}{\varepsilon_1} = 4 \times \frac{DP}{P_1} \quad (\%)$$

- Incerteza no diâmetro da tubulação ( $D$ ):

Calculada a partir da medição de oito diâmetros diferentes, realizada com um paquímetro (resolução de 0,02mm). Obteve-se para a incerteza aleatória igual a 0,33%, adotando-se o limite previsto pela norma ISO 5167:

$$\left( \frac{\delta D}{D} \right)_{\text{combinada}} = \pm 0,4\%$$

- Incerteza no diâmetro do furo da placa de orifício ( $d_o$ ):

A verificação realizada através de uma máquina de medição por coordenadas (resolução de 0,001mm), verificou-se que a incerteza aleatória neste diâmetro é da ordem de 0,01%, adotando-se valor inferior ao limite estabelecido na norma ISO 5167, igual a:

$$\left( \frac{\delta d_o}{d_o} \right)_{\text{combinada}} = \pm 0,05\%$$

- Incerteza na medição de pressão diferencial da placa de orifício ( $DP_{\text{placa}}$ ):

Para esta grandeza tem-se a incerteza combinada, considerando um valor sistemático e outro aleatório. O valor aleatório foi avaliado a partir da medições efetuadas em cada ensaio, e o valor sistemático foi admitido fixo:

$$\left( \frac{\delta DP_{\text{placa}}}{DP_{\text{placa}}} \right)_{\text{combinada}} = \left[ \left( \frac{\delta DP_{\text{placa}}}{DP_{\text{placa}}} \right)_{\text{sistemática}}^2 + \left( \frac{\delta DP_{\text{placa}}}{DP_{\text{placa}}} \right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left( \frac{\delta DP}{DP} \right)_{\text{sistemática}}^2 = \pm 0,5\%$

- Incerteza na determinação da massa específica ( $\rho$ ):

A massa específica foi determinada através das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido, tomadas em um psicrômetro de aspiração que utiliza termopares tipo J com sensores. A incerteza sistemática adotada para o psicrômetro foi recomendada pela ASHRAE na sua publicação, *Brochure on Psychrometry*, e a incerteza aleatória foi tomada como sendo a contribuição das grandezas que influem na determinação da massa específica, que são as temperaturas e a pressão atmosférica local.

$$\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{combinada}}^2 = \left[ \left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{sistemática psicrômetro}}^2 + \left(\frac{\delta T1}{T1}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta T2}{\delta T2}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta Pb}{\delta PB}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left(\frac{\delta\rho}{\rho}\right)_{\text{sistemática psicrômetro}} = \pm 2\%$

Incerteza na medição de pressão diferencial do multifuros ( $DP_{\text{mult}}$ ):

Para esta grandeza, também tem-se a incerteza combinada, O valor aleatório foi avaliado a partir da medições efetuadas em cada ensaio, e o valor sistemático foi admitido fixo:

$$\left(\frac{\delta DP_{\text{mult.}}}{DP_{\text{mult.}}}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta DP_{\text{mult.}}}{DP_{\text{mult.}}}\right)_{\text{sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta DP_{\text{mult.}}}{DP_{\text{mult.}}}\right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde

$$\left(\frac{\delta DP_{\text{mult.}}}{DP_{\text{mult.}}}\right)_{\text{sistemática}}^2 = \pm 0,5\% \text{ para Transdutor nº 2}$$

ou

$$\left(\frac{\delta DP_{\text{mult.}}}{DP_{\text{mult.}}}\right)_{\text{sistemática}}^2 = \pm 0,75\% \text{ para Transdutor nº 1}$$

Incerteza na pressão estática absoluta ( $P_1$ ):

Estima-se a incerteza combinada, considerando as incertezas sistemáticas dos medidores utilizados, e a incerteza aleatória associada à medição com o transdutor de pressão.

$$\left(\frac{\delta P_1}{P_1}\right)_{\text{absoluta combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta P_1}{P_1}\right)_{\text{efetiva sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta P_1}{P_1}\right)_{\text{efetiva aleatória}}^2 + \left(\frac{\delta Pb}{Pb}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left(\frac{\delta P_1}{P_1}\right)_{\text{efetiva sistemática}} = \pm 0,5\%$

- Incerteza na Temperatura de Bulbo Seco (T1):

Estima-se a incerteza combinada, considerando as incertezas sistemática e aleatória.

$$\left(\frac{\delta T1}{T1}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta T1}{T1}\right)_{\text{sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta T1}{T1}\right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

com  $\left(\frac{\delta T1}{T1}\right)_{\text{sistemático}} = \pm 0,75\%$

- Incerteza na Pressão Atmosférica (ou barométrica) (Pb):

As incertezas das medidas na pressão atmosférica foram estimadas a partir de medições realizadas com o barômetro da EPUSP, instalado nos laboratórios de máquinas térmicas, comparado com valores obtidos simultaneamente do barômetro do Laboratório de Medidas de Vazão do IPT.

$$\left(\frac{\delta Pb}{Pb}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta Pb}{Pb}\right)_{\text{sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta Pb}{Pb}\right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde  $\left(\frac{\delta Pb}{Pb}\right)_{\text{sistemática}} = \pm 0,5\%$  e  $\left(\frac{\delta Pb}{Pb}\right)_{\text{aleatória}} = \pm 0,5\%$

- Incerteza na viscosidade dinâmica ( $\mu$ ):

Estima-se a incerteza combinada, considerando as incertezas sistemática e aleatória. Onde a incerteza sistemática é tomada a partir da regressão que aproximou a função que relaciona a viscosidade dinâmica com a temperatura por uma reta.

$$\left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)_{\text{sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

com  $\left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right)_{\text{sistemático}} = \pm 0,5\%$  (incerteza da regressão) e

$$\left(\frac{\delta\mu}{\mu}\right)_{\text{aleatória}} = \pm \left(\frac{0,474 \text{ E} - 7 \times \delta T4}{\mu}\right)$$

- Incerteza na velocidade média no conduto (V):

Estima-se a incerteza combinada, a partir dos valores combinados obtidos para as grandezas envolvidas:

$$\left(\frac{\delta V}{V}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta S}{S}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

onde:  $\left(\frac{\delta S}{S}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{2 \times \delta D}{D}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$

- Incerteza no N° de Reynolds (R):

Estima-se a incerteza combinada, a partir dos valores combinados obtidos para as variáveis presentes na sua equação:

$$\left(\frac{\delta R}{R}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta \rho}{\rho}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta V}{V}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{\delta \mu}{\mu}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- Incerteza no coeficiente de vazão do multifuros (K):

Estima-se a incerteza combinada, a partir dos valores combinados obtidos para as grandezas envolvidas:



$$\left(\frac{\delta K}{K}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta Q_{\text{placa}}}{Q_{\text{placa}}}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{2 \times \delta D}{D}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left[ \left(-\frac{1}{2} \frac{\delta DP_{\text{mult.}}}{DP_{\text{mult.}}}\right)_{\text{combinada}}^2 + \left(\frac{1}{2} \frac{\delta \rho}{\rho}\right)_{\text{combinada}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- Incerteza na Temperatura da ar no conduto (T4):

Estima-se a incerteza combinada, considerando as incertezas sistemática e aleatória.

$$\left(\frac{\delta T4}{T4}\right)_{\text{combinada}} = \left[ \left(\frac{\delta T4}{T4}\right)_{\text{sistemática}}^2 + \left(\frac{\delta T4}{T4}\right)_{\text{aleatória}}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

com  $\left(\frac{\delta T4}{T4}\right)_{\text{sistemático}} = \pm 0,75\%$

**ANEXO E**

**DETERMINAÇÃO DOS VALORES MÉDIOS PARA O COEFICIENTE DE  
VAZÃO E RESPECTIVOS INTERVALOS DE VARIAÇÃO**

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTÓTIPO MODELO S 1A

Perfil externo: Circular

Arranjo Interno: 01 interpolador de 6.4 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medicao 12124

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31660
Valor Máximo =	297600
Max- Min. =	265940
Media =	0.596
Variação (%) = 17.1	

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31660
Valor Máximo =	84200
Max- Min. =	52540
Media =	0.562
Variação (%) = 7.1	

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	105300
Valor Máximo =	297600
Max- Min. =	192300
Media =	0.624
Variação (%) = 8.2	

Tabela E1 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 1A

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S 1B

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: Medição 05124

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31750
Valor Máximo =	297000
Max. Min =	265250
Media =	0 097
Variação (%) =	0 599
	16.2

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31750
Valor Máximo =	80740
Max. Min =	48990
Media =	0 041
Variação (%) =	0 568
	7.2

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 100 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	104200
Valor Máximo =	297000
Max. Min =	192800
Media =	0 046
Variação (%) =	0 624
	7.4

Tabela E2 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 1B

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S2A

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora s/ interpolador

Nº de orifícios a jueante: 1

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação medição: 05,124

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	30870
Valor Máximo =	298600
Max - Min. =	267730
Media =	0 110
Variação (%) =	0 584
	18 8

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	30870
Valor Máximo =	84830
Max - Min. =	53960
Media =	0 054
Variação (%) =	0 554
	9 7

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 100 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	104200
Valor Máximo =	298600
Max - Min. =	194400
Media =	0 050
Variação (%) =	0 609
	8 2

Tabela E3 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 2A

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTÓTIPO MODELO: S 2B

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora + 01 tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido: Ar

Padrão: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação medição 05124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31450
Valor Máximo =	299000
Max-Min =	267550
Media =	0 082
Variação (%) =	0 585
	14 0

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31450
Valor Máximo =	85290
Max-Min =	53840
Media =	0 037
Variação (%) =	0 560
	6 6

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	104200
Valor Máximo =	299000
Max-Min =	194800
Media =	0 045
Variação (%) =	0 605
	7 4

Tabela E4 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 2B

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S 2C

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: somente régua divisora

Nº de orifícios a jusante: 04

Arranjo Experimental MV 22

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 14124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 30630	0,508
Valor Máximo = 286500	0,613
Max-Min = 255870	0,105
Média =	0,574
Variação (%) 18,3	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 30630	0,508
Valor Máximo = 84040	0,574
Max-Min = 53410	0,066
Média =	0,551
Variação (%) 12,0	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 105200	0,577
Valor Máximo = 286500	0,613
Max-Min = 181300	0,036
Média =	0,598
Variação (%) 6,0	

Tabela E5 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 2C

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S 2D  
 Perfil externo: circular  
 Arranjo Interno: régua divisora + 01 tubo interpolador  
 Nº de orifícios a jusante: 4

Arranjo Experimental MV 2 2  
 Fluido: Ar  
 Padrão: Placa de orifício  
 Nº de dados para cálculo de médias: 1000  
 Observação: medição 28124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 31000	0,523
Valor Máximo = 289900	0,609
Max - Min = 258900	0,086
Média =	0,572
Variação (%) 15,0	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 31000	0,523
Valor Máximo = 84040	0,571
Max - Min = 53040	0,048
Média =	0,550
Variação (%) 8,7	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 104100	0,574
Valor Máximo = 289900	0,609
Max - Min = 185800	0,035
Média =	0,593
Variação (%) 5,9	

Tabela E6 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 2D



## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTOTIPO MODELO: S2E**

Perfil externo: circular

Arranjo Interno régua divisora+02 tubos interpoladores

Nº de orifícios a jusante 4

Arranjo Experimental MV 22

Fluido Ar

Padrao Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias 1000

Observação medição 28124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	0 510
Valor Máximo =	0 606
Max-Min =	0 096
Média =	0 570
Variação (%) 16.9	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 85 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	0 510
Valor Máximo =	0 571
Max-Min =	0 061
Média =	0 547
Variação (%) 11.2	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	0 575
Valor Máximo =	0 606
Max-Min =	0 031
Média =	0 592
Variação (%) 5.2	

Tabela E7 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 2E

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO S3A

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: 01 tubo interpolador de 5,4 mm

Nº de orificios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 09124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	32610
Valor Máximo =	296300
Max-Min =	263690
Media =	0.540
Variação (%) =	14.5

Cplaca  
0.609  
0.619  
  
0.010  
0.613  
  
1.7

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	32610
Valor Máximo =	86270
Max-Min =	53660
Media =	0.520
Variação (%) =	10.0

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	106600
Valor Máximo =	296300
Max-Min =	189700
Media =	0.556
Variação (%) =	3.8

Tabela E8 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 3A

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S3B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: sem tubo interpolador

Nº de orificios a jusante 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido Ar

Padrao: Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias 1000

Observação: medição 12124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 30630	0 491
Valor Máximo = 295600	0 562
Max - Min. = 264970	0 071
Media =	0 541
Variação (%) = 13 1	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 30630	0 491
Valor Máximo = 84480	0 544
Max - Min. = 53850	0 053
Media =	0 524
Variação (%) = 10 1	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 105300	0 545
Valor Máximo = 295600	0 562
Max - Min. = 190300	0 017
Media =	0 555
Variação (%) = 3 1	

Tabela E9 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 3B

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S3C

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: 01 tubo interpolador de 5 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação medição 12124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 29930	0,495
Valor Máximo = 295600	0,570
Max - Min = 265670	0,075
Media =	0,547
Variação (%) =	13,7

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 29930	0,495
Valor Máximo = 83730	0,547
Max - Min = 53800	0,052
Media =	0,530
Variação (%) =	9,8

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 105600	0,556
Valor Máximo = 288900	0,570
Max - Min = 183300	0,014
Media =	0,565
Variação (%) =	2,5

Tabela E10 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 3C

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO S 4A

Perfil externo Octogonal

Arranjo Interno: régua dividora com tubo interpolador

Nº de orificios a jusante 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido Ar

Padrao Placa de orificio

Nº de dados para calculo de médias 1000

Observação medição 06124

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31260
Valor Máximo =	296400
Max. Min =	265140
Media =	0.070
	0.536
Variacao (%)=	13.1

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31260
Valor Máximo =	94230
Max. Min =	52970
Media =	0.051
	0.517
Variacao (%)=	9.9

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo =	105100
Valor Máximo =	296400
Max. Min =	191300
Media =	0.015
	0.552
Variacao (%)=	2.7

Tabela E11 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 4A

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: S 4B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora + 1 tubo interpolador de 5 mm

Nº de orifícios a jusante 01

Arranjo Experimental MV 2.2

Fluido Ar

Padrao: Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 06124

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31440
Valor Máximo =	289900
Max-Min =	258460
Media =	0 531
Variação (%)=	10.4

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 85 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31440
Valor Máximo =	82650
Max-Min =	51210
Media =	0 517
Variação (%)=	6.8

Análise da variação do Coef. Vazao (K)	
Faixa de Reynolds: 100 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	103900
Valor Máximo =	289900
Max-Min =	186000
Media =	0 545
Variação (%)=	3.1

Tabela E12 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 4B (med.06124)

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO S4B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora + 1 tubo interpolador de 5mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 22

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para calculo de media: 1000

Observação: medição 13124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo = 32450	0,476
Valor Máximo = 296000	0,554
Max-Min = 263550	0,078
Media =	0,531
Variação (%) = 14,7	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 85 000	
Rey	K
Valor Mínimo = 32450	0,476
Valor Máximo = 83770	0,531
Max-Min = 51320	0,055
Media =	0,513
Variação (%) = 10,7	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo = 104500	0,533
Valor Máximo = 296000	0,554
Max-Min = 191100	0,021
Media =	0,547
Variação (%) = 3,8	

Tabela E13 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 4B (med. 13124)

ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO S 4B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora + 1 tubo interpolador de 5 mm

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 22

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 31660	0,480
Valor Máximo = 289200	0,563
Max-Min. = 257540	0,073
Média =	0,528
Variação (%) =	13,8

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30.000 a 85.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 31660	0,480
Valor Máximo = 82610	0,532
Max-Min. = 50950	0,052
Média =	0,510
Variação (%) =	10,2

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100.000 a 300.000	
Rey	K
Valor Mínimo = 104400	0,536
Valor Máximo = 289200	0,563
Max-Min. = 184800	0,017
Média =	0,545
Variação (%) =	3,1

Tabela E14 - Valor médio para K e intervalos de variação total - protótipo 4B (med.05015)



ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

MEDIDOR ANNUBAH - DIETERICH

Perfil externo Octogonal  
 Arranjo Interno: 01 tubo interpolador  
 Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental MV 2 2

Fluido: Ar  
 Padrão: Placa de orifício  
 Nº de dados para cálculo de médias: 1000  
 Observação: medição 08124

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31940
Valor Máximo =	296900
Max-Min. =	264960
Media =	0 584
Variação (%) = 16.8	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 30 000 a 85 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	31940
Valor Máximo =	86030
Max-Min. =	54090
Media =	0 560
Variação (%) = 13.0	

Análise da variação do Coef. Vazão (K)	
Faixa de Reynolds: 100 000 a 300 000	
Rey	K
Valor Mínimo =	107500
Valor Máximo =	296900
Max-Min. =	189400
Media =	0 605
Variação (%) = 3.1	

Tabela E15 - Valor médio para K e intervalos de variação total - medidor ANR 75

**ANEXO F**

**MEDIÇÃO DE VAZÃO COM PERFIL DE VELOCIDADES  
ASSIMÉTRICO**

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTOTIPO MODELO: S 1A**

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: 01 tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.3

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico

Ensaio N <sup>o</sup>	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	F1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.									
5	639	4	140.3	1.1	93.4	0.8	25.7	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.1821	0.0025	9.61	0.15	8.72E+04	3E+03
6	924	5	200.7	1.5	93.3	0.8	25.7	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.218	0.003	11.52	0.18	1.05E+05	3E+03
8	3777	19	771	6	92.5	0.8	25.5	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.435	0.006	23.0	0.4	2.09E+05	6E+03
10	7547	38	1414	11	91.4	0.8	25.5	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.606	0.009	32.0	0.5	2.91E+05	9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico (tabelas 22 e 23) e comparação com resultados apresentados pela placa de orifício.

Ensaio N <sup>o</sup>	K	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	0.585	0.179	0.1821	1.9
6	0.593	0.217	0.218	0.8
8	0.624	0.447	0.435	2.7
10	0.640	0.620	0.606	2.4
Média das diferenças (%).....				1.9

**LEGENDA:**

- DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)
- F1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício
- T4 = Temperatura do ar no duto
- Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)
- M.Esp. = Massa específica do ar

Ensaio N <sup>o</sup>	K (Rey>100000) tabela 23	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.596	0.218	0.218	0.3
8	0.624	0.447	0.435	2.7
10	0.639	0.619	0.606	2.2
Média das diferenças (%).....				1.7

- Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício
- Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D
- Rey = N<sup>o</sup> de Reynolds em função do diâmetro D
- K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros
- Inc. = Incerteza global associada 'a cada grandeza

Tabela F1 - Medicao de vazao com perfil de velocidades assimétrico - Prototipo 1A

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTOTIPO MODELO: 1B**

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.3

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico

Ensaio N°	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m3)	Qplaca± Inc. (m3/s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.			
5	618	3	135.3	1.0	93.6	0.7	0.1779	0.0025	9.38	0.15	8.68E+04	3E+03
6	912	5	197.2	1.5	93.6	0.7	0.216	0.003	11.38	0.18	1.05E+05	3E+03
8	3722	19	749	6	93.6	0.7	0.429	0.006	22.7	0.4	2.10E+05	6E+03
10	7568	38	1414	11	93.6	0.7	0.603	0.009	31.8	0.5	2.95E+05	9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico (tabelas 22 e 23) e comparação com resultados apresentados pela placa de orifício.

Ensaio N°	K	Qmult. (m3/s)	Qplaca (m3/s)	Diferença (%)
5	0.589	0.176	0.1779	1.2
6	0.597	0.215	0.2157	0.3
8	0.625	0.439	0.4293	2.3
10	0.640	0.618	0.6025	2.5
Média das diferenças (%).....				1.6

Ensaio N°	K (Rey>100000)	Qmult. (m3/s)	Qplaca (m3/s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.598	0.216	0.2157	0.0
8	0.625	0.439	0.4293	2.3
10	0.640	0.618	0.6025	2.5
Média das diferenças (%).....				1.6

**LEGENDA:**

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)  
 P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício  
 T4 = Temperatura do ar no duto  
 Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)  
 M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício  
 Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D  
 Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D  
 K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros  
 Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela F2 – Medicao de vazao com perfil de velocidades assimétrico – Prototipo 1B

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: 2E

Perfil externo: circular

Arranjo Interno: régua divisora+ 02 tubos interpoladores

Nº de orifícios a jusante: 04

Arranjo Experimental: MV 2.3

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico

Ensaio N <sup>o</sup>	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.			
5	620	3	141.4	1.1	93.6	0.7	0.1786	0.0025	9.42	0.15	8.65E+04	3E+03
6	910	5	205.5	1.5	93.6	0.7	0.216	0.003	11.39	0.18	1.05E+05	3E+03
8	3741	19	796	6	93.6	0.7	0.431	0.006	22.8	0.4	2.09E+05	6E+03
10	7555	38	1502	8	93.6	0.7	0.604	0.009	31.9	0.5	2.93E+05	9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico (tabelas 22 e 23) e comparação com resultados apresentados pela placa de orifício.

Ensaio N <sup>o</sup>	K	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	0.564	0.172	0.1786	3.7
6	0.571	0.210	0.216	2.7
8	0.597	0.433	0.431	0.3
10	0.611	0.608	0.604	0.6
Média das diferenças (%).....				1.8

Ensaio N <sup>o</sup>	K (Rey>100000) tabela 23	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.576	0.212	0.216	1.8
8	0.593	0.430	0.431	0.4
10	0.607	0.604	0.604	0.0
Média das diferenças (%).....				0.7

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)  
 P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício  
 T4 = Temperatura do ar no duto  
 Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)  
 M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício  
 Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D  
 Rey = N<sup>o</sup> de Reynolds em função do diâmetro D  
 K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros  
 Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela F3 – Medicao de vazao com perfil de velocidades assimétrico – Prototipo 2E

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

PROTOTIPO MODELO: 3B

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.3

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orificio

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico

Ensaio N°	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)		Vub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.						
							Qplaca	Inc.								
5	624	3	158.7	1.2	93.4	0.8	25.6	0.2	1.08	0.03	0.1798	0.0025	9.49	0.15	8.62E+04	3E+03
6	924	5	233.8	1.8	93.3	0.8	25.6	0.2	1.08	0.03	0.218	0.003	11.52	0.18	1.05E+05	3E+03
8	3755	19	910	7	92.4	0.8	25.6	0.2	1.08	0.03	0.434	0.006	22.9	0.4	2.08E+05	6E+03
10	7500	38	1746	9	91.3	0.8	25.4	0.2	1.08	0.03	0.604	0.009	31.9	0.5	2.90E+05	9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico (tabelas 22 e 23) e comparação com resultados apresentados pela placa de orificio.

Ensaio N°	K tabela 22	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	0.535	0.174	0.1798	3.4
6	0.539	0.213	0.218	2.6
8	0.556	0.433	0.434	0.3
10	0.564	0.608	0.604	0.6
Média das diferenças (%).....				1.7

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orificio, multífuros)

P1(abs.) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orificio

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Ensaio N°	K (Rey>100000) tabela 23	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.546	0.215	0.218	1.4
8	0.555	0.432	0.434	0.5
10	0.559	0.603	0.604	0.2
Média das diferenças (%).....				0.7

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orificio

Vub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multífuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela F.4 – Medicao de vazao com perfil de velocidades assimétrico – Prototipo 3B

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTOTIPO MODELO: 4A**

Perfil externo: Octogonal

Arranjo Interno: régua divisora sem tubo interpolador

Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.3

Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício

Nº de dados para cálculo de médias: 1000

Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico

Ensaio Nº	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.
5	621 4	161.6 1.2	93.4 0.8	23.8 0.2	93.6 0.7	1.09 0.03	0.1787 0.0025	9.43 0.15	8.68E+04 3E+03
6	966 5	248.1 1.9	93.3 0.8	23.8 0.2	93.6 0.7	1.09 0.03	0.222 0.003	11.71 0.19	1.08E+05 3E+03
8	3770 19	935 7	92.4 0.8	23.7 0.2	93.6 0.7	1.09 0.03	0.433 0.006	22.8 0.4	2.11E+05 6E+03
10	7506 38	1789 9	91.3 0.8	23.7 0.2	93.6 0.7	1.09 0.03	0.601 0.009	31.7 0.5	2.93E+05 9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico e comparação com resultados apresentados pela placa de orifício.

Ensaio Nº	K tabela 22	Qmult (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	0.530	0.173	0.1787	3.3
6	0.535	0.216	0.222	2.5
8	0.553	0.434	0.433	0.2
10	0.561	0.610	0.601	1.4
Média das diferenças (%).....				1.9

### LEGENDA:

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multífuros)

P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício

T4 = Temperatura do ar no duto

Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)

M.Esp. = Massa específica do ar

Ensaio Nº	K (Rey>100000) tabela 23	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.543	0.220	0.222	1.0
8	0.552	0.433	0.433	0.1
10	0.556	0.604	0.601	0.4
Média das diferenças (%).....				0.5

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício

Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D

Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D

K = Coeficiente de vazao para o medidor multífuros

Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela F5 – Medição de vazao com perfil de velocidades assimétrico – Prototipo 4A

## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**PROTOTIPO MODELO: 4B**  
 Perfil externo: Octogonal  
 Arranjo interno: régua divisor+1 tubo interpolador de 5 mm  
 Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.3  
 Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício  
 Nº de dados para cálculo de médias: 1000  
**Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico**

Ensaio N°	DPplaca± Inc. (Pa)	DPmult± Inc. (Pa)	P1(abs)± Inc. (kPa)	T4± Inc. (°C)	Pb± Inc. (kPa)	M.Esp± Inc. (kg/m <sup>3</sup> )	Qplaca± Inc. (m <sup>3</sup> /s)	Vtub± Inc. (m/s)	Rey± Inc.									
5	629	4	166.6	1.3	93.4	0.8	26.0	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.1807	0.0025	9.53	0.15	8.64E+04	3E+03
6	931	5	241.3	1.8	93.3	0.8	25.9	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.219	0.003	11.57	0.19	1.05E+05	3E+03
8	3768	19	943	7	92.4	0.8	26.0	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.435	0.006	23.0	0.4	2.08E+05	6E+03
10	7503	38	1795	9	91.3	0.8	25.7	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.605	0.009	31.9	0.5	2.89E+05	9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico (tabelas 22 e 23, medição 06124) e comparação com resultados apresentados pela placa de orifício.

Ensaio N°	K	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	0.528	0.176	0.1807	2.7
6	0.532	0.213	0.219	2.8
8	0.548	0.434	0.435	0.3
10	0.556	0.608	0.605	0.5
Média das diferenças (%).....				1.6

Ensaio N°	K (Rey>100000)	Qmult. (m <sup>3</sup> /s)	Qplaca (m <sup>3</sup> /s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.536	0.215	0.219	2.0
8	0.547	0.433	0.435	0.5
10	0.552	0.603	0.605	0.2
Média das diferenças (%).....				0.9

**LEGENDA:**

DPplaca,mult. = Pressao diferencial (placa de orifício, multifuros)  
 P1(abs) = Pressao estática absoluta a montante da placa de orifício  
 T4 = Temperatura do ar no duto  
 Pb = Pressao atmosférica local (barométrica)  
 M.Esp. = Massa específica do ar

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício  
 Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D  
 Rey = N° de Reynolds em função do diâmetro D  
 K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros  
 Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela F6 – Medicao de vazao com perfil de velocidades assimétrico – Prototipo 4B



## ENSAIO DE MEDIDOR MULTIFUROS

**MEDIDOR ANNUBAR – ANR 75 – DIETERICH**  
 Perfil externo: Octogonal  
 Arranjo Interno: 01 tubo interpolador  
 Nº de orifícios a jusante: 01

Arranjo Experimental: MV 2.3  
 Fluido: Ar

Padrao: Placa de orifício  
 Nº de dados para cálculo de médias: 1000  
 Observação: medição 05015; Perfil Veloc. Assimétrico

Ensaio Nº	DPplaca (Pa)	DPmult (Pa)	P1(abs) (kPa)	T4 (°C)	Pb (kPa)	M.Esp (kg/m3)	Qplaca (m3/s)	Vtub (m/s)	Rey									
5	621	3	138.5	1.0	93.4	0.8	25.1	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.1790	0.0025	9.44	0.15	8.63E+04	3E+03
6	939	5	204.0	1.5	93.3	0.8	25.2	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.220	0.003	11.59	0.19	1.06E+05	3E+03
8	3734	19	776	6	92.5	0.8	25.0	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.432	0.006	22.8	0.4	2.08E+05	6E+03
10	7519	38	1468	7	91.4	0.8	25.2	0.2	93.6	0.7	1.08	0.03	0.604	0.009	31.9	0.5	2.91E+05	9E+03

Cálculo da vazao utilizando a equação para K obtida com perfil simétrico (tabelas 22 e 23) e comparação com resultados apresentados pela placa de orifício.

Ensaio Nº	K simétrico	Qmult. (m3/s)	Qplaca (m3/s)	Diferença (%)
5	0.575	0.174	0.179	2.5
6	0.582	0.214	0.2196	2.4
8	0.606	0.435	0.4324	0.7
10	0.618	0.611	0.6043	1.2
Média das diferenças (%).....				1.7

**LEGENDA:**

DPplaca,mult. = Pressão diferencial (placa de orifício, multifuros)  
 P1(abs.) = Pressão estática absoluta a montante da placa de orifício  
 T4 = Temperatura do ar no duto  
 Pb = Pressão atmosférica local (barométrica)  
 M.Esp. = Massa específica do ar

Ensaio Nº	K (Rey>100000) tabela 23	Qmult. (m3/s)	Qplaca (m3/s)	Diferença (%)
5	-	-	-	-
6	0.594	0.219	0.220	0.4
8	0.605	0.435	0.432	0.5
10	0.611	0.604	0.604	0.1
Média das diferenças (%).....				0.3

Qplaca = Vazao em volume medida através da placa de orifício  
 Vtub = Velocidade média na tubulação com diâmetro D  
 Rey = Nº de Reynolds em função do diâmetro D  
 K = Coeficiente de vazao para o medidor multifuros  
 Inc. = Incerteza global associada a cada grandeza

Tabela F7 – Medição de vazao com perfil de velocidades assimétrico – Medidor Annubar ANR 75

**APÊNDICE I**

**PROGRAMAS DE COMPUTADOR DESENVOLVIDOS**

```

) ($N+)
) (PROGRAMA PARA AQUISICAO DE DADOS)
) program central;
) uses cadunit,dos,crt,psicro;
) var numermed,numleia,j,i,leituras,l:integer;
)   c:real;
)   a:real;
)   b,cara:char;
)   f,f1:text;
)   x:array[1..2] of real;
)   numcn:array[1..2] of byte;
)   leia:array[0..15] of integer;
)   m1:real;
)   m3,m2,tf:real;
)   vet1,veti2:array[0..7] of real;
)   matriz,matriz2:array[0..15,0..4] of real;
)   vet,vet2:veter;
)   arquivo:string[50];
)   linha:string[226];
)   verd,verd2,verdade:boolean;
) procedure termopar;
) begin
) assign(f,'ajuste.pas');
) reset(f);
) while not eof(f) do begin
)   read(f,i);
)   for j:=4 downto 0 do
)     read(f,matriz[i+3,j]);
) end;
) close(f);
) assign(f,'ajustel.pas');
) reset(f);
) while not eof(f) do begin
)   read(f,i);
)   for j:=0 to 1 do
)     read(f,matriz[i,j]);
)   for J:=2 to 4 do
)     matriz[i,j]:=0;
) end;
) close(f);
) end;
) function elev(x:real;y:integer):real;
) var valor:real;
)   sinal:integer;
) begin
)   if y<>0 then
)     if x=0 then elev:=0 else begin
)       valor:=exp(ln(abs(x))*y);
)       sinal:=trunc((abs(x)/x)-(y-(y xor 1))) div 2;
)       sinal:=sinal or 1;
)       elev:=valor*sinal;
)     end
)   else elev:=1;
) end;
) function trans(digital,canal:integer):real;

```

```

const
zero:array[0..1,0..7] of real=((0,0,0,0,0,0,0,0),(-32767.57,-32766.83,-32766.10,-32767.76,2370,853,-105,-59));
topo:array[0..1,0..7] of real=((4,4,4,4,4,4,4,4),(-19818.59,-19801.09,-19808.22,-19812.37,26501,24755,24035,24306)); I . 2
var
transl:real;
begin
    transl:=(topo[0,canal]-zero[0,canal])*((digital-zero[1,canal])/((topo[1,canal]-zero[1,canal])));
    trans:=transl+zero[0,canal];
end;
function transl(digital,canal:integer):real;
const
zero:array[0..1,0..7] of real=((0,0,0,0,0,0,0,0),(-32767.57,-32766.83,-32766.10,-32767.76,2370,853,-105,-59));
topo:array[0..1,0..7] of real=((4,4,4,4,4,4,4,4),(-19818.59,-19801.09,-19808.22,-19812.37,26501,24755,24035,24306));
begin
    transl:=(topo[0,canal]-zero[0,canal])*((digital)/((topo[1,canal]-zero[1,canal])));
end;
function resulta(canal,digital:integer):real;
var res,a:real;
    i:integer;
begin
    res:=0;
    a:=trans(digital,canal);
    if canal >=0 then
        for i:=4 downto 0 do
            res:=res+matriz[canal,i]*elev(a,i)
        else
            res:=a;
        resulta:=res;
end;
function resulta2(canal,digital:integer):real;
var res,a:real;
    i:integer;
begin
    res:=0;
    a:=transl(digital,canal);
    if canal >=0 then
        for i:=4 downto 1 do
            res:=res+i*matriz[canal,i]*elev(trans(vet[canal],canal),i-1)
        else
            res:=a;
        resulta2:=abs(res*a);
end;

begin
termopar;
inicializacao;
LIMPAPIFO;
{$I-}
clrscr;
gotoxy(0,0);
write('Qual o nome do arquivo de Saida :');
readln(arquivo);
verdade:=true;
while verdade do begin
verdade:=false;

```

```

assign(f,arquivo);
append(f);
if IOresult<>0 then begin
  verdade:=true;
  rewrite(f);
  assign(f1,'cabec.pas');
  reset(f1);
  while not eof(f1) do begin
    readln(f1,linha);
    writeln(f,linha);
  end;
  close(f);
  close(f1);
end;
end;
{write('Entre com a Pressao Atmosferica (kPa) :');
readln(pb);
}
pb:=93.626;
verd:=false;
leituras:=0;
write('Entre com o numero de leituras para a media :');
readln(numlermed);
write('Entre com o numero de leituras de medias :');
readln(numleia);
write('Impressao durante gravacao <S/QQ tecla> :');
cara:=readkey;
verd2:=(cara='S') or (cara='s');
repeat
repeat
  leitura(7,numlermed,vet,vet2);
  for i:=0 to 7 do begin
    veti[i]:=resulta(i,vet[i]);
    veti2[i]:=resulta2(i,vet2[i]);
  end;

  clrscr;
  if (not verd) or ((verd) and (verd2)) then begin
    gotoxy(1,0);
    writeln('transdutor 1 :',veti[1]:7:5,' mmH2O ',veti2[1]:13);
    writeln('transdutor 2 :',veti[2]:7:5,' mmH2O ',veti2[2]:13);
    writeln('transdutor 3 :',veti[3]:7:5,' mmH2O ',veti2[3]:13);
    writeln('transdutor 4 :',veti[0]:7:5,' mmH2O ',veti2[0]:13);
    writeln('termopar 1 :',veti[4]:4:1,' graus C ',veti2[4]:10);
    writeln('termopar 2 :',veti[5]:4:1,' graus C ',veti2[5]:10);
    writeln('termopar 3 :',veti[6]:4:1,' graus C ',veti2[6]:10);
    writeln('termopar 4 :',veti[7]:4:1,' Graus C ',veti2[7]:10);
  end;
  tbs:=veti[4];
  tbu:=veti[5];
  calcula(verd,verd2);
  if verd then begin
    for i:=0 to 3 do
      write(f,veti[i]:8:5,' ',veti2[i]:13,' ');
    for i:=4 to 7 do
      write(f,veti[i]:4:1,' ',veti2[i]:10,' ');
  end;
end;
end;

```

```
writeln(f,pb:7:2,' ',Ur:7:3,' ',Ua:7:5,' ',V:7:5,' ',Pv:7:5,' ',R:7:3);
inc(leituras)
end;
until (keypressed) or (leituras>=numleia);
if numleia>leituras then begin
b:=readkey;
verd:=(b=#32) xor (verd);
end
else b:='C';
until b='C';
close(f);
end.
```

```
{ $N+ }
program PLINCERT;
{ Antonio Luis C. Mariani e Samy Lima Assi }
```

I.5

```
{ Versao 3.0 }
{ Programa para calculo de resultados em ensaios de medicao de vazao
atraves do uso de placa de orificio como padrao na medicao }
{ Esta versao esta concebida para ensaio de medidores multifuros,
fazendo o calculo de parametros de interesse neste ensaio e de
suas respectivas incertezas }
{ Refinamento da versao 2.2 }
```

```
uses crt,dos;
```

```
const
```

```
{ Para uso nos calculos das grandezas }
```

```
D=0.15535;
```

```
DO=0.10010;
```

```
Beta=DO/D;
```

```
L1=1;
```

```
L2=0.5;
```

```
So=(3.14159265358979*DO*DO)/4;
```

```
S1=(3.14159265358979*D*D)/4;
```

```
Kci=1.4;
```

```
tc=9.8088;
```

```
{ Para uso nos calculos de incertezas }
```

```
{ Incertezas relativas sistemáticas }
```

```
ISDPplaca=0.005;
```

```
ISPr1=0.005;
```

```
ISRO=0.02;
```

```
ISPb=0.005;
```

```
ISMI=0.005;
```

```
IST1=0.0075;
```

```
IST2=0.0075;
```

```
IST4=0.0075;
```

```
var
```

```
{ Para uso nos calculos das grandezas }
```

```
T1,T2,T4,Rey,Cf,DPmult,DPplaca,E1,Qpl,lixo,Pr1,Prlef,Ve,Pb,K,MI,Vtub:real;
```

```
f,f1,f2:text;
```

```
argent,arqsai:string[50];
```

```
transd:array[1..4] of real;
```

```
Nmulti,Nplaca,i,NP1:integer;
```

```
Texto:string[240];
```

```
{ Para uso nos calculos de incertezas }
```

```
ICDPplaca,IADPplaca,ICDPmult,IADPmult,ISDPmult,ICPr1,IAPr1,ICC,ICE1:real;
```

```
ICD,ICDO,ICRO,ICPb,IAPb,ICMI,ICQpl,ICVtub,ICRe,ICK:real;
```

```
ICT1,ICT2,ICT4,IAT1,IAT2,IAT4:real;
```

```
IADP:array[1..4] of real;
```

```
Aux1,Aux2,Aux3:real;
```

```
function reno(V:real):real;
{Calcula do Numero de Reynolds}
var
  Re:real;
begin
  Re:=V*D/(MI*Ve);
  Reno:=Re;
end;
```

```
function C_MI(T4:real):real;
{Calcula a viscosidade dinamica do ar em Pa.s a partir de T4 em °C}
{Faixa de temperatura recomendada para a equacao: 0 a 50 °C}
begin
  C_MI:=(0.474*T4+172.4064)*1E-7
end;
```

```
function elev(x,y:real):real;
{Funcao auxiliar para calculos de potencias}
begin
  elev:=exp(y*ln(x));
end;
```

```
function calc_c(V:real):real;
{Calcula o coeficiente de descarga para placa de orificio utilizando
a equacao de Stolz; referencia norma ISO 5167-1:1991(E)}
{Auxilia o calculo da vazao}
var c:real;
begin
  c:=0.5959+0.0312*elev(Beta,2.1)-0.1840*elev(Beta,8);
  c:=c+0.0029*elev(Beta,2.5)*elev((1E6)/Reno(V),0.75);
  calc_c:=c+0.039*elev(Beta,4)/(1-elev(Beta,4))-0.015839*elev(Beta,3);
end;
```

```
function epsilon(DP,p1:real):real;
{Calcula o coeficiente de compressibilidade conforme norma ISO 5167-1:1991(E)}
begin
  E1:=(1-(0.41 + 0.35*elev(Beta,4))*DP/(Kci*p1));
  epsilon:=E1;
end;
```

```
function Vazao(C,DP,Ve,Pl:real):real;
{Auxilia o calculo da vazao atraves da placa de orificio}
begin
  Vazao:=C*So*sqrt(2*DP*Ve)*epsilon(DP,Pl)*(1/sqrt(1-elev(Beta,4)));
end;
```

```
function conv(DP,Ve,MI,Pl:real):real;
```



{Calcula a vazao atraves da placa de orificio, Norma ISO 5167-1:1991(E)}

```
var
  V,Ci,Q:real;
begin
  Cf:=0.6;
  repeat
    Ci:=Cf;
    Q:=Ci*So*sqrt(2*DP*Ve);
    Q:=vazao(Ci,DP,Ve,P1);
    V:=Q/S1;
    Cf:=calc_c(V);
  until (abs(Cf-Ci)<1E-6);
  conv:=vazao(Cf,DP,Ve,P1);
end;
```

I.7

function Calc\_K(DPm,Ve,Qplaca:real):real;  
{Calcula o Coeficiente de Vazao (K), do medidor multifuros}

```
begin
  Calc_K:=Qplaca/(S1*(Sqrt(2*DPm*Ve)));
end;
```

begin

```
  clrscr;
  repeat
    Write('Entre nome do arquivo de entrada :');
    readln(Argent);
    {$I-}
    assign(f,argent);
    reset(f);
    if IOresult<>0 then writeln(' Arquivo inexistente ');
  until IOresult=0;

  Write('Entre com o nome do arquivo de Saida :');
  readln(arqsai);

  assign(f1,arqsai);
  rewrite(f1);
  {$I+}
  write('Entre com o numero do transdutor do Multifuros :');
  readln(Nmulti);
  write('Entre com o numero do transdutor da Placa :');
  readln(Nplaca);
  write('Entre com o numero do transdutor da pressao P1:');
  readln(Np1);
  readln(f);
  readln(f);
  assign(f2,'Cabinc30.pas');
  reset(f2);
  readln(f2,texto);
  writeln(f1,texto);
  readln(f2,texto);
  writeln(f1,texto);
  close(f2);
```

```

repeat
  read(f,transd[4],IADP[4]);
  for i:=1 to 3 do
    read(f,transd[i],IADP[i]);
  Prief:=transd[NP1]*tc;
  IAPri:=IADP[NP1]*tc;
  DPmult:=transd[Nmulti]*tc;
  IADPmult:=IADP[Nmulti]*tc;
  DPplaca:=transd[Nplaca]*tc;
  IADPplaca:=IADP[Nplaca]*tc;
  read(f,T1,IAT1,T2,IAT2,lixo,lixo,T4,IAT4,Pb);
  readln(f,lixo,lixo,Ve);

  MI:=C_MI(T4);           {calculo da viscosidade dinamica}
  Pb:=Pb*1000;           {transformacao da pressao atm. para Pa}
  Pr1:=Pb-Prief;         {calculo da pressao estatica efetiva
                          a montante da placa; para pest.<patm.}
  Qpl:=conv(DPplaca,Ve,MI,Pr1); {calculo da vazao atraves da placa de
                                de orificio; calculo iterativo, utilizando
                                varias funcoes}
  E1:=epsilon(DPplaca,Pr1); {calculo do coeficiente de compressibilidade}

  K:=Calc_K(Dpmult,Ve,Qpl); {calculo do coeficiente de vazao para o
                              multifuros}
  Vtub:=Qpl/S1;           {calculo da velocidade media nas secoes com
                              diametro D, em funcao dos valores finais}
  Rey:=Vtub*D/(Ve*MI);   {calculo do n° de Reynolds em em funcao dos
                              valores finais grandezas envolvidas}

  {CALCULOS DE INCERTEZAS}
  IAPb:=0.005*Pb;
  if Nmulti=1 then ISDPmult:=0.0075;
  if Nmulti=2 then ISDPmult:=0.005;
  if IAT1=0 then IAT1:=0.0032;

  {Calculo das incertezas combinadas}
  {pressao}
  ICDPplaca:=DPplaca*sqrt(elev(IADPplaca/DPplaca,2)+(ISDPplaca*ISDPplaca));
  ICDPmult:=DPmult*sqrt(elev(IADPmult/DPmult,2)+(ISDPmult*ISDPmult));
  ICPb:=Pb*sqrt(elev(IAPb/Pb,2)+(ISPb*ISPb));
  ICPri:=Pr1*sqrt(elev(IAPri/Prief,2)+(ISPr1*ISPr1)+elev(ICPb/Pb,2));

  {temperatura}
  ICT1:=T1*sqrt(elev(IAT1/T1,2)+(IST1*IST1));
  ICT2:=T2*sqrt(elev(IAT2/T2,2)+(IST2*IST2));
  ICT4:=T4*sqrt(elev(IAT4/T4,2)+(IST4*IST4));

  {Propriedades fisicas do fluido e da instalacao}
  ICD:=0.004*D;
  ICDO:=0.0005*D0;
  ICE1:=E1*(0.04*(DPplaca/Pr1));
  ICC:=(Beta/100)*Cf;

```

```

ICRO:=(1/Ve)*sqrt((ISRO*ISRO)+(elev(ICT1/T1,2))+(elev(ICT2/T2,2))+
(elev(ICPb/Pb,2)));
ICMI:=MI*sqrt((ISMI*ISMI)+(elev((0.474E-7*ICT4/MI),2)));

```

```
{Resultados}
```

```

Aux1:=(elev((2*elev(Beta,4))/(1-elev(Beta,4)),2)*elev(ICD/D,2));
Aux2:=(elev(2/(1-elev(Beta,4)),2)*elev(ICDO/DO,2));
Aux3:=elev(ICDPplaca/(2*DPplaca),2)+elev(ICRO/(2*(1/Ve)),2);
ICQpl:=Qpl*sqrt(elev(ICC/Cf,2)+elev(ICE1/E1,2)+Aux1+Aux2+Aux3);

ICVtub:=Vtub*sqrt(elev(ICQpl/Qpl,2)+elev(2*ICD/D,2));
ICRe:=Rey*sqrt(elev(ICRO/(1/Ve),2)+elev(ICVtub/Vtub,2)+elev(ICD/D,2)+
elev(ICMI/MI,2));
ICK:=K*sqrt(elev(ICQpl/Qpl,2)+elev(2*ICD/D,2)+elev(ICDPmult/(2*DPmult),2)+
elev(ICRO/(2/Ve),2));

write(f1,DPplaca:8:0,ICDPplaca:3:0,DPmult:11:1,ICDPmult:5:1,(Pr1/1000):9:2);
write(f1,(ICPr1/1000):5:2,T4:9:1,ICT4:4:1,(Pb/1000):9:2,(ICPb/1000):5:2);
write(f1,(1/Ve):9:2,ICRO:5:2,Qpl:9:4,ICQpl:7:4);
write(f1,(Vtub):9:2,ICVtub:5:2,' ',Rey:12,ICRe:10,K:9:3,ICK:6:3);
writeln(f1,' ',MI:12,ICMI:10,E1:9:4,ICE1:7:4,Cf:9:4,ICC:7:4);

```

```
until eof(f);
```

```
close(f);
```

```
close(f1);
```

```
end.
```

```
program AGRUPA1;  
{Versao 2.0}  
{Programa que agrupa os valores registrados em varios arquivos  
em um unico arquivo}  
{Indicado para agrupar os dados dos ensaios}
```

I.10

```
uses crt,dos;  
var f,f1:text;  
    argen,arquivo2,arquivo:string[20];  
    linha:string[255];  
    i,j,fi:integer;  
    a:string[2];  
  
begin  
    writeln('Entre nome de arquivo de saida :');  
    readln(arquivo);  
    writeln('Entre arquivo de entrada :');  
    readln(arquivo2);  
    assign(f,arquivo);  
    rewrite(f);  
    writeln(f);  
    writeln(f);  
    writeln('Faixa de numero i,f :');  
    readln(i,fi);  
    for j:=i to fi do begin  
        if j<10 then str(j:1,a)  
        else str(j:2,a);  
        argen:=arquivo2+a;  
        assign(f1,argen);  
        reset(f1);  
        readln(f1,linha);  
        readln(f1,linha);  
        repeat  
            readln(f1,linha);  
            writeln(f,linha);  
        until eof(f1);  
        close(f1);  
    end;  
    close(f);  
end.
```

```
program AGRUPA2;
{Versao 2.1}
{Programa que agrupa os valores registrados em varios arquivos
em um unico arquivo}
{Indicado para agrupar os resultados dos ensaios}
```

I.11

```
uses crt,dos;
var f,f1,f2:text;
    argen,arquivo2,arquivo:string[20];
    linha,texto:string[255];
    i,j,fi:integer;
    a:string[2];

begin
    writeln('Entre nome de arquivo de saida :');
    readln(arquivo);
    writeln('Entre arquivo de entrada :');
    readln(arquivo2);
    assign(f,arquivo);
    rewrite(f);

        assign(f2,'cabinc22.pas');
        reset(f2);
        readln(f2,texto);
        writeln(f,texto);
        readln(f2,texto);
        writeln(f,texto);
        close(f2);

{ writeln(f);}
{ writeln(f);}
    writeln('Faixa de numero i,f :');
    readln(i,fi);
    for j:=i to fi do begin
        if j<10 then str(j:1,a)
        else str(j:2,a);
        argen:=arquivo2+a;
        assign(f1,argen);
        reset(f1);
        readln(f1,linha);
        readln(f1,linha);
            repeat
                readln(f1,linha);
                writeln(f,linha);
            until eof(f1);
        close(f1);
    end;
    close(f);
end.
```